

3100000011953

3971

TUGAS AKHIR

(NA 1701)

**ANALISA STRESS CORROSION CRACKING PADA
ALUMINIUM TYPE 5083 DALAM MEDIA KOROSIF**



PERPUSTAKAAN ITS	
Tgl. Terima	28-6-2000
Terima Dori	H
No. Agenda Prp.	21-418

RSPe
620.112 23
Bud
a-1
1999

OLEH :

ERWAN BUDIYANTO

NRP. 4193.100.038

JURUSAN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
1999



LEMBAR PENGESAHAN

ANALISA STRESS CORROSION CRACKING PADA ALUMINIUM TYPE 5083 DALAM MEDIA KOROSIF

DIAJUKAN GUNA MEMENUHI PERSYARATAN UNTUK MERAIH
GELAR SARJANA TEKNIK JURUSAN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER SURABAYA

SURABAYA, JULI 1999
MENGETAHUI/MENYETUJUI,
DOSEN PEMBIMBING,



IR. SOEWEIFY, M.Eng.

NIP. 130 368 597



LEMBAR REVISI

TELAH DIREVISI SESUAI DENGAN HASIL SIDANG TUGAS AKHIR
TANGGAL 3 AGUSTUS 1999

ANALISA STRESS CORROSION CRACKING PADA ALUMINIUM TYPE 5083 DALAM MEDIA KOROSIF

SURABAYA, AGUSTUS 1999

MENGETAHUI/MENYETUJUI,
DOSEN PEMBIMBING,

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Soe', followed by a long horizontal line extending to the right.

IR. SOEWEIFY, M.Eng.

NIP. 130 368 597

To all my student,
who make me late to finish my study.
Keep your spirit to study hard and never give up

ABSTRAK

Material yang telah memiliki retak pada suatu struktur apabila diberi beban berulang, retak tersebut akan menjalar dan dalam batas tertentu struktur tersebut akan mengalami kegagalan.

Selama proses kelelahan, ada beberapa faktor yang berpengaruh, antara lain : besarnya beban dan lingkungan. Apabila suatu material berada dalam lingkungan yang korosif dan diberi beban berulang maka terbentuklah suatu keadaan yang disebut fatigue corrosion dan apabila material mengalami retak, retak tersebut akan menjalar dengan cepat dalam lingkungan yang korosif. Hal ini akan menyebabkan struktur mengalami kegagalan pada tingkat tegangan jauh dibawah tegangan statik yang dapat membuatnya pecah (Stress Corrosion Cracking/SCC).

Aluminium merupakan salah satu logam yang tahan terhadap proses korosi dan memiliki kekuatan yang cukup baik. Akan tetapi hal ini bukan berarti aluminium tidak dapat terkena korosi, terutama jika aluminium mengalami cacat/retak sebelumnya atau mengalami treatment sebelumnya, misalnya pengelasan.

Dalam tugas akhir ini akan diteliti pengaruh lingkungan dan laju perambatan retak pada aluminium type 5083 (Al-Mg 4,5-Mn), dimana material akan diberikan beban berulang dan dalam lingkungan korosif (air laut).

Hasil dari pengujian ini akan didapatkan laju perambatan retak, da/dN , dalam kondisi lingkungan yang berbeda. Dengan memakai persamaan Paris-Edorgan akan diketahui laju perambatan retak menengah.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa, atas segala anugerah dan rahmat-Nya sehingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik.

Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya atas segala dukungan dan bantuan, baik moril maupun materiil, kami sampaikan kepada :

- Bpk. Ir. Koestowo S.W., Kepala Jurusan Teknik Perkapalan ITS sekaligus sebagai dosen wali.
- Bpk. Ir. Soeweify, M.Eng, dosen pembimbing Tugas Akhir ini, atas segala petunjuk dan bantuannya.
- Seluruh dosen di Teknik Perkapalan FTK-ITS.
- Direktur Umum, Ka. Diklat, Manager H/C DKP, beserta staf DKP PT PAL SURABAYA, atas bantuan materialnya.
- Kepala dan seluruh teknisi Laboratorium Konstruksi dan Kekuatan.
- Kepala dan seluruh teknisi Laboratorium Teknologi Mekanik.
- Orang tua dan saudara kami, atas dukungan dan doa untuk menyelesaikan tugas ini.
- Rekan-rekan se-angkatan (P – 33), "*viva P-33*".
- Segala pihak yang tidak dapat kami sebutkan satu persatu.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk meraih gelar kesarjanaan di jurusan Teknik Perkapalan FTK-ITS. Besar harapan penulis agar Tugas Akhir ini dapat memberikan sedikit kontribusi dalam bidang perencanaan struktur dan kekuatan kapal, khususnya mengenai aluminium.

Kekurangan-kekurangan yang ada dalam tugas ini masih banyak, oleh karena itu saran dan kritik untuk perbaikan dan pengembangan tugas ini akan diterima dengan tangan terbuka.

Surabaya, Juli 1999

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	ii
ABSTRAK	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR NOTASI	xv
BAB I PENDAHULUAN	
I.1. Latar Belakang	I-1
I.2. Tujuan	I-2
I.3. Batasan Masalah	I-3
I.4. Metodologi Penelitian	I-3
BAB II KELELAHAN DAN KEPECAHAN	
II.1. Mekanisme Kelelahan dan Perambatan	II-1
II.2. Proses Kelelahan	II-3
II.2.1. Penggelinciran Berulang	II-4
II.2.2. Retak Inti	II-4
II.2.3. Pertumbuhan Retak Mikro	II-5
II.2.4. Pertumbuhan Retak Makro	II-6
II.2.5. Kegagalan Akhir	II-7
II.3. Perambatan Retak	II-7
II.3.1. Faktor Intensitas Tegangan	II-7

	II.3.2. Fracture Toughness (K_{IC})	II-9
	II.3.3. Laju Perambatan Retak Menengah	II-11
	II.4. Mekanisme Kelelahan	II-13
	II.4.1. Pertumbuhan Retak dan Striation	II-15
	II.4.2. Karakteristik dari Kelelahan dan Kepecahan	II-18
BAB III	KOROSI	
	III.1. Pendahuluan	III-1
	III.2. Teori Dasar Korosi	III-1
	III.3. Prinsip Dasar Terjadinya Korosi	III-3
	III.4. Faktor Penyebab Terjadinya Korosi	III-4
	III.4.1. Sifat Material	III-4
	III.4.2. Faktor Lingkungan	III-5
BAB IV	STRESS CORROSION CRACKING	
	IV.1. Pendahuluan	IV-1
	IV.2. Stress Corrosion Cracking	IV-2
	IV.3. Proses Terjadinya Korosi Tegangan	IV-4
	IV.3.1. Tahap Pemicuan	IV-5
	IV.3.2. Tahap Penjalaran Retak	IV-6
	IV.4. Gambaran Mikroskopik dan Makroskopik SCC	IV-8
	IV.5. SC Test, Variabel dan Tujuan Pengetesan	IV-10
	IV.6. Aspek-aspek Praktis SCC	IV-13
BAB V	PELAKSANAAN DAN HASIL PENGUJIAN	
	V.1. Pendahuluan	V-1
	V.2. Ukuran Spesimen Uji	V-1

V.2.1.	Spesimen Uji Tarik	V-2
V.2.2.	Spesimen Uji Dinamis	V-2
V.3.	Pelaksanaan Pengujian	V-5
V.3.1.	Pengujian Tarik	V-5
V.3.2.	Penentuan Besar Beban Uji Dinamis	V-6
V.3.3.	Persiapan dan Pelaksanaan Pengujian Dinamis	V-7
BAB VI	PERHITUNGAN DAN ANALISA HASIL PENGUJIAN	
VI.1.	Perhitungan Data Hasil Pengujian Dinamis	VI-1
VI.1.1.	Perhitungan Laju Perambatan Retak	VI-1
VI.1.2.	Perhitungan Rentang FIT	VI-1
VI.1.3.	Grafik Laju Perambatan Retak	VI-10
VI.2.	Analisa Hasil Pengujian	VI-14
VI.2.1.	Analisa Hasil Perambatan Retak	VI-14
VI.2.2.	Analisa Grafik Laju Perambatan Retak	VI-15
VI.2.3.	Analisa Konstanta C dan m	VI-18
VI.2.4.	Analisa Beban dan Proses Kimia yg Terjadi	VI-19
BAB VII	KESIMPULAN DAN SARAN	
VII.1.	Kesimpulan	VII-1
VII.2.	Saran	VII-2
DAFTAR PUSTAKA		VIII-1
LAMPIRAN		

DAFTAR GAMBAR

GAMBAR	KETERANGAN
2.1	Tahapan (mode) dari proses kelelahan
2.2	Skema fase retak material
2.3	Retak kecil yang digambarkan lebih awal dari usianya kecuali pada tingkatan low-stress
2.4	Retak untuk pelat tak terbatas
2.5	Fracture Toughness sebagai fungsi σ yield
2.6	Diagram variasi signoidal laju perambatan retak da/dN dengan SIF
2.7	Model Wood untuk inisiasi retak mikro pada pita penggelinciran
2.8	Dua sistim kontribusi penggelinciran menuju bukaan retak pada cara yang sama menurut Wood
2.9	Tahap pertumbuhan retak pada permukaan bebas dan penetrasi ke dalam material
2.10	Dua model untuk mikroplastisitas dan striation
2.11	Dua bagian kegagalan dan kelelahan
2.12	Perbandingan antara kegagalan statis dan kegagalan akhir
2.13	Perpindahan Tensile Mode ke Shear Mode pada material pelat
2.14	Pertumbuhan retak kelelahan tegak lurus terhadap tegangan utama
2.15	Permukaan kepecahan benda uji bertakik
3.1	Proses terjadinya korosi akibat kimia listrik
3.2	Pengaruh konsentrasi larutan terhadap laju korosi

- 4.1 Kurva komposisi relatif ketahanan SCC untuk stainless steel dalam 42% MgCl_2
- 4.2 Peran utama slip step dalam peretakan peka lingkungan
- 4.3 Mekanisme absorpsi oleh ion hidrogen
- 4.4.a Ujung retak pada mikroskop (900 x)
- 4.4.b Permukaan patah pada mikroskop elektron (14000 x)
- 4.5 Hasil pengujian Stress Corrosion Life
- 4.6 Hasil pengujian retak korosi tegangan (SCC)
- 4.7 Pengujian kerentanan terhadap SCC melalui pengukuran laju pertumbuhan retak
- 5.1 Spesimen uji tarik
- 5.2 Spesimen uji dinamis
- 5.3 Proses pembuatan spesimen uji dinamis
- 5.4 Bentuk dan ukuran akhir spesimen uji dinamis
- 5.5 Model beban yang dipakai
- 6.1 Grafik laju perambatan retak untuk spesimen A1 (dilas dan lingkungan normal)
- 6.2 Grafik laju perambatan retak untuk spesimen B1 (dilas dan lingkungan normal)
- 6.3 Grafik laju perambatan retak untuk spesimen A2 (dilas dan lingkungan korosif)
- 6.4 Grafik laju perambatan retak untuk spesimen B2 (dilas dan lingkungan korosif)

- 6.5 Grafik laju perambatan retak untuk spesimen C1 (tanpa las dan lingkungan normal)
- 6.6 Grafik laju perambatan retak untuk spesimen C2 (tanpa las dan lingkungan normal)
- 6.7 Spesimen uji ARALL-1 (30°) sesudah mengalami kepecahan
- 6.8 Perbandingan laju perambatan retak A1, A2, B1, dan B2
- 6.9 Perbandingan laju perambatan retak untuk semua spesimen uji
- 6.10 Kurva pertumbuhan retak untuk spesimen ARALL-1 dan 2024

DAFTAR TABEL

TABEL	KETERANGAN
5.1	Ukuran dari spesimen uji tarik
5.2	Hasil pengujian tarik
5.3	Hasil pengujian spesimen A1
5.4	Hasil pengujian spesimen A2
5.5	Hasil pengujian spesimen B1
5.6	Hasil pengujian spesimen B2
5.7	Hasil pengujian spesimen C1
5.8	Hasil pengujian spesimen C2
6.1	Perhitungan da/dN pada spesimen A1
6.2	Perhitungan da/dN untuk spesimen B1
6.3	Perhitungan da/dN untuk spesimen A2
6.4	Perhitungan da/dN untuk spesimen B2
6.5	Perhitungan da/dN untuk spesimen C1
6.6	Perhitungan da/dN untuk spesimen C2
6.7	Perhitungan rentang FIT untuk spesimen A1
6.8	Perhitungan rentang FIT untuk spesimen B1
6.9	Perhitungan rentang FIT untuk spesimen A2
6.10	Perhitungan rentang FIT untuk spesimen B2
6.11	Perhitungan rentang FIT untuk spesimen C1
6.12	Perhitungan rentang FIT untuk spesimen C2
6.13	Rentang laju perambatan retak pada spesimen uji

6.14 Hasil perhitungan kontanta C dan m

DAFTAR NOTASI

A	= luas penampang terhadap beban
a	= panjang retak
a_c	= panjang retak pada kondisi tak tentu
a_n	= jarak ujung retak dengan garis tengah lubang pin
α	= perbandingan panjang retak dengan lebar spesimen
B	= tebal spesimen
β	= efisiensi proses penumpulan
C	= konstanta persamaan Paris Erdogan
CTOD	= <i>compact type open displacement</i> , bukaan ujung retak
$da, \Delta a$	= pertambahan panjang retak
da/dN	= laju perambatan retak
ΔK	= rentang faktor intensitas tegangan
ΔN	= pertambahan siklus beban
ΔP	= rentang beban
F_{app}	= beban aplikasi
K	= faktor intensitas tegangan (SIF)
K_c	= fracture toughness
K_I	= faktor intensitas tegangan mode I
K_{ISCC}	= fracture toughness untuk kondisi lingkungan korosif
K_{maks}	= faktor intensitas tegangan maksimum
K_{min}	= faktor intensitas tegangan minimum

m	= konstanta eksponen persamaan Paris Erdogan
N	= jumlah siklus beban
P	= beban
P_m	= beban rata-rata
P_{max}	= beban maksimum
P_{min}	= beban minimum
R	= perbandingan beban minimum dengan beban maksimum
$\sigma_{0,2}$	= tegangan luluh (metode offset)
σ_c	= tegangan nominal yang dikenakan pada retak pada kondisi tak tentu
σ_{cy}	= tegangan yang bekerja
σ_{yield}	= tegangan luluh
X	= F_{app} , beban aplikasi
Y	= penunjukkan beban pada strain indicator



BAB I

PENDAHULUAN

BAB I

PENDAHULUAN

I.1. LATAR BELAKANG.

Perkembangan dunia industri dewasa ini mulai banyak melirik aluminium sebagai bahan utama dalam proses industri, contohnya adalah pembuatan pesawat terbang. Hal ini dikarenakan aluminium cukup memenuhi persyaratan, baik dari segi kekuatan maupun dari segi ketahanan terhadap korosi. Selain itu aluminium lebih ringan dibandingkan dengan besi/baja. Dalam dunia perkapalan, penggunaan aluminium mulai dipopulerkan sebagai pengganti besi/baja.

Aluminium merupakan suatu jenis logam yang tahan terhadap korosi karena adanya lapisan pelindung, yang melindungi logam terhadap lingkungan yang dapat merusak permukaan logam. Namun bukan berarti aluminium tidak dapat terkena proses korosi, terutama bila lapisan pelindung pada aluminium mengalami kerusakan akibat perlakuan terhadap material.

Perkembangan struktur atau konstruksi di laut sangat dipengaruhi kondisi lingkungan laut, karena dalam pengoperasiannya, kondisi laut sangat berpengaruh terhadap kondisi struktur. Komposisi dari elemen air laut dan beban lingkungan laut yang diterima struktur adalah hal yang berpengaruh. Beban lingkungan laut ini dapat dibagi menjadi beban statis dan beban dinamis.

Beban lingkungan ada 2 macam yaitu beban statis dan beban dinamis. Beban statis, yaitu dimana besar dan arahnya konstan, demikian pula lendutan dan tegangan yang dihasilkan adalah konstan. Sedangkan beban dinamis, dimana

besar dan arahnya berubah-ubah, demikian pula lendutan dan tegangan yang dihasilkan juga berubah-ubah. Beban dinamis dapat dibedakan menjadi 2, yaitu beban impact dan beban kelelahan.

Kelelahan adalah suatu proses perubahan-perubahan struktur dasar yang mengalami tegangan berulang. Yang perlu diperhatikan pada kelelahan struktur adalah pada kenyataannya retakan biasanya dimulai dari permukaan bebas. Hal ini sangat berbahaya bagi material yang mengalami pengelasan, terutama jika hasil pengelasan tersebut tidak baik. Jadi kondisi permukaan sangat mempengaruhi kegagalan kelelahan.

Adanya lingkungan korosif pada suatu struktur yang biasanya menimbulkan lubang pada permukaan. Secara teoritis lubang yang ada berfungsi sebagai takik. Apabila serangan korosif ini diikuti dengan adanya pembebanan berulang, maka akan terjadi penurunan usia kelelahan yang lebih besar daripada akibat serangan korosif saja.

1.2. TUJUAN.

- Meneliti Stress Corrosion Cracking (SCC) pada aluminium dan pengaruhnya terhadap laju perambatan retak.
- Meneliti pengaruh kondisi lingkungan terhadap laju perambatan retak pada aluminium dan hasil pengelasan aluminium.
- Menganalisa pengaruh arah serat (*fibre orientation*) terhadap laju perambatan retak pada aluminium.

I.3. BATASAN MASALAH.

Dalam tugas akhir ini mempunyai beberapa batasan agar masalah yang akan dibahas lebih terfokuskan. Batasan-batasan yang diambil :

1. Material yang dipakai adalah aluminium type 5083 (Al-Mg 4,5-Mn).
2. Material uji dianggap sudah mempunyai cacat awal, berupa takikan.
3. Pembebanan yang dipakai adalah tegak lurus terhadap penjalaran retak.
4. Pengelasan yang terjadi dianggap sudah memenuhi persyaratan yang ada.
5. Dianggap tidak ada residual stress akibat dari proses pembuatan material uji.
6. Dimensi struktur yang ditinjau relatif lebih besar dibandingkan retak yang ada.
7. Suhu dalam pengujian adalah suhu ruangan.
8. Kondisi korosif yang dipakai adalah larutan amonia dengan kadar 21%.

I.4. METODOLOGI PENELITIAN.

- Analisa Literatur.

Metode analisa literatur digunakan dengan mendapatkan masukan-masukan dari paper-paper dari beberapa percobaan yang telah dilakukan untuk memperkuat dasar teori.

- Metode Eksperimen.

Mengamati langsung di laboratorium konstruksi dengan memakai mesin uji dinamis, yaitu laju perambatan retak pada kondisi korosif pada aluminium tanpa pengelasan dengan aluminium yang dilas. Hasil dari pengamatan tersebut dibandingkan untuk mengetahui fatigue korosi pada ketiga material tersebut.



BAB II

KELELAHAN DAN KEPECAHAN

BAB II

KELELAHAN PADA MATERIAL

II.1. MEKANISME KELELAHAN DAN PERAMBATAN.

Suatu struktur dan komponen pada kenyataannya menerima tegangan yang seringkali berubah, baik besar maupun arahnya. Kondisi yang demikian akan menimbulkan kerusakan pada struktur yang disebut dengan kegagalan lelah (*fatigue failure*).

Kegagalan terbagi menjadi beberapa bagian menurut penyebabnya [Knott, 1976] :

- kegagalan karena *buckling*,
- kegagalan karena *jamming*,
- kegagalan karena *yielding*,
- kegagalan karena *necking*, dan
- kegagalan karena *cracking*.

Dalam tulisan ini akan dibahas kegagalan karena *cracking* yang disebabkan kelelahan akibat adanya *low stress*. Retak yang dibahas disini adalah retak stabil yang penjarannya dapat dideteksi.

Kegagalan karena retak (*cracking*) dapat digolongkan menjadi 3 macam [Broek, 1984] :

- *fatigue cracking*,
- *hydrogen cracking*, dan

- *stress corrosion cracking*.

Adanya suatu cacat pada komponen logam akan menimbulkan kegagalan karena terjadinya pemusatan tegangan, dimana tegangan tidak dapat didistribusikan secara merata pada semua ikatan dalam struktur kristal dengan sempurna.

Pada pelat yang memiliki cacat awal (*notch*), gaya luar yang dikenakan padanya akan mengalami perubahan arah distribusi yang menyebabkan meningkatnya tegangan lokal.

Proses pembuatan (*manufacturing*), mekanisme mekanik atau mekanisme korosif merupakan tahap terbentuknya cacat awal (*initiation*) yang kemudian dapat menjalar akibat mekanis atau mekanisme korosif.

Pembentukan retak dibawah pembebanan, dipengaruhi oleh bentuk pembebanan, antara lain :

1. Mode I (*Opening in Tension*).

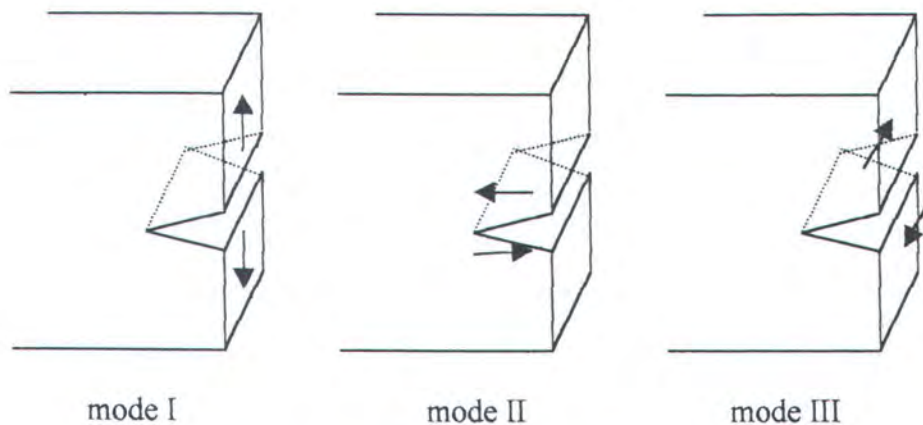
Crack Opening Mode, retak dibuka lebar pada permukaan retakan akibat adanya tegangan tarik yang tegak lurus terhadap bidang penjalaran retak.

2. Mode II (*Forward Shear*).

In Plane Mode, bagian retak searah dengan bidang penjalaran retak, yang diakibatkan oleh tegangan geser.

3. Mode III (*Transverse Shear*).

Anti Plane Shearing Mode, perambatan retak seperti robekan karena permukaan retakan tergeser terhadap lainnya dalam arah sejajar tepi takikan. Retak yang diakibatkan tegangan geser yang bekerja pada arah melintang dan membentuk sudut dengan arah penjalaran retak.



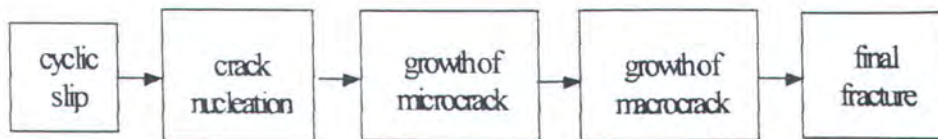
Gambar 2.1. Tahapan (mode) dari proses kelelahan.

Karena retak kelelahan memiliki tendensi kuat pada pertumbuhan tegak lurus terhadap tegangan tarik, maka mode I paling berpengaruh terhadap kekuatan struktur [Broek,1984].

II.2. PROSES KELELAHAN.

Perlu diketahui proses-proses yang terjadi didalam struktur material selama usia kelelahan (*fatigue life*) dan untuk menentukan umur kelelahan tersebut kita tinjau dalam 5 fase [Schijve,1982], antara lain :

1. Penggelinciran Berulang (*Cyclic Slip*).
2. Retak Inti (*Crack Nucleation*).
3. Pertumbuhan Retak Mikro (*Microcrack Growth*).
4. Pertumbuhan Retak Makro (*Macrocrack Growth*).
5. Kegagalan Akhir (*Final Failure*).



Gambar 2.2. Skema fase retak material.

II.2.1. Penggelinciran Berulang.

Pada pembebanan berulang yang relatif rendah dibandingkan pembebanan statis, penggelinciran berulang akan terjadi dalam sejumlah kecil butiran dari *polycrystalline* material (garis kristal majemuk/ganda).

Butiran ini merupakan fenomena lokal, karena hanya pada beberapa pita saja tegangan geser berulang cukup tinggi untuk menghasilkan slip. Slip berulang inilah yang dapat menyebabkan terjadinya kelelahan.

II.2.2. Retak Inti.

Setelah jumlah beban berulang, retak mikro dapat ditemukan dalam pita-pita penggelinciran. Suatu penelitian mikroskopik menyatakan bahwa retak inti terjadi pada awal usia kelelahan, kemungkinannya adalah beberapa persen dari usia kelelahan.

Dua aspek penting yang dapat menerangkan masalah retak inti, antara lain :

- Butiran pada permukaan material tidak selalu dikelilingi oleh butiran lain. Pada sisi luar adalah lingkungan yang tidak solid (tidak padat). Pada sisi ini akan menyebabkan rendahnya penahan microplastisitas. Pada permukaan bebas slip lebih mudah terjadi dengan jarak

penggelinciran jauh lebih besar karena tidak adanya penahan butiran-butiran didekatnya.

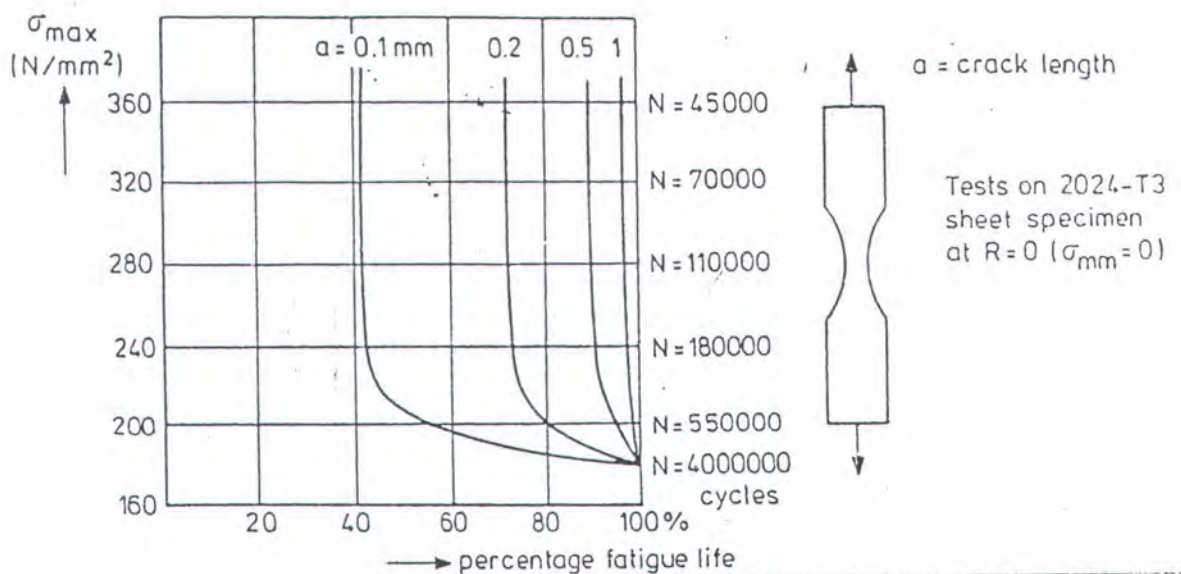
- Butiran-butiran permukaan selalu berhubungan dengan lingkungan. Bahkan untuk udara normal pun keberadaan oksigen dan uap air dapat menyatu dengan penggelinciran berulang untuk menghasilkan retak inti. Contoh yang penting untuk retak inti di permukaan bebas seperti pemasukan (*inclusion*) pada inti. Ini dapat terjadi pada *low alloy* lingkungan strength steel pada inclusion yang kecil. Akibat berbagai campuran tersebut mengakibatkan kecenderungan butiran dan susunan kristal yang terjadi akibat pemasukan pada daerah permukaan akan mengalami retak inti. Hal ini mungkin merupakan hasil dari argumen pertama dimana terdapat hambatan yang lebih rendah di dekat permukaan bebas.

II.2.3. Pertumbuhan Retak Mikro.

Dalam suatu retak mikro, menggambarkan konsentrasi tegangan pada ujung retak (*crack tip*) yang akan terjadi. Penggelinciran berulang akan terkonsentrasi pada ujung retak menuju ke penjaralan retak selanjutnya. Seperti ditunjukkan pada studi mikroskopis pertumbuhan retak mikro dapat meliputi bagian yang relatif besar dari usia kelelahan. Dengan kata lain, pada beberapa saat awal usia kelelahan, retak dapat dilihat dengan mata telanjang dan kemudian disebut retak makro. Hal ini dapat dilihat pada gambar yang menunjukkan setelah 1 mm retak dapat dilihat hanya dalam prosentase yang kecil dari usia kelelahan sampai terjadi kegagalan. Hasil yang maksimum dapat terlihat pada spesimen tanpa takikan,

dimana pada spesimen dengan takikan, retak makro dapat terjadi pada kondisi awal.

Pernyataan lain menyebutkan bahwa pertumbuhan retak mikro pada atau didekat permukaan meliputi bagian yang besar dari usia kelelahan. Berarti bahwa kondisi lokal pada permukaan material dan kualitas permukaan material sangat berarti bagi umur kelelahan yang sebagian besar ada fase retak makro.



Gambar 2.3. Retak kecil yang digambarkan lebih awal dari usianya kecuali pada tingkatan low-stress.

II.2.4. Pertumbuhan Retak Makro.

Perpindahan dari retak mikro ke makro tidak dapat didefinisikan secara kuantitatif. Secara nominal, retak makro adalah retak yang dapat dilihat dengan mata telanjang. Sebagai tambahan dinyatakan pertumbuhan retak tidak lagi tergantung pada permukaan lokal dan kondisi material yang berperan dalam retak inti dan pertumbuhan retak mikro, namun retak makro dapat mewakili nilai dari pertumbuhan retak itu sendiri.

Pertumbuhan retak yang ada menyarankan transisi dari mikro ke makro sekitar 1 mm, namun tidak ada ketentuan bahwa harga tersebut harus diambil. Pada beberapa kasus, *fatigue crack nucleation* muncul pada permukaan yang berkualitas tinggi dan retak tersebut akan muncul sebagai retak makro yang relatif awal dari usia yang diperkirakan. Juga apabila perambatan retak diawali dari cacat makro, maka hal itu adalah retak makro dari permulaan. Pada kasus lain, kerusakan permukaan telah menyebabkan perambatan retak makro pada awal umur pelayanan (*service life*).

II.2.5. Kegagalan Akhir.

Pada saat retak makro menjalar lebih besar, penampang melintang struktur yang tidak mengalami retak menjadi lebih kecil. Akhirnya karena penampang terlalu kecil untuk menerima beban berulang maksimum, maka terjadi kegagalan sebagai siklus akhir dari uji kelelahan. Kegagalan akhir biasanya menunjukkan makro plastisitas tertentu seperti kegagalan karena beban statis.

II.3. PERAMBATAN RETAK.

Dalam perambatan retak yang terjadi dalam struktur, ada beberapa faktor yang berpengaruh di dalamnya.

II.3.1. Faktor Intensitas Tegangan.

Faktor Intensitas Tegangan (*Stress Intensity Factor*) adalah parameter yang menggambarkan keadaan dari ujung retak, yang dilambangkan dengan huruf K

dengan subscript mode pembebanannya. Besar K ini tergantung pada pembebanan, konfigurasi bentuk (geometri), ketajaman retak dan mode pertambahan retak.

Faktor Intensitas Tegangan untuk pelat tak terhingga dituliskan dengan persamaan [Broek,1984] :

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi.r}} f_{ij}(\theta) \quad \dots (2.1)$$

dimana : $K_I = \sigma\sqrt{\pi a}$,

σ = tegangan, dan

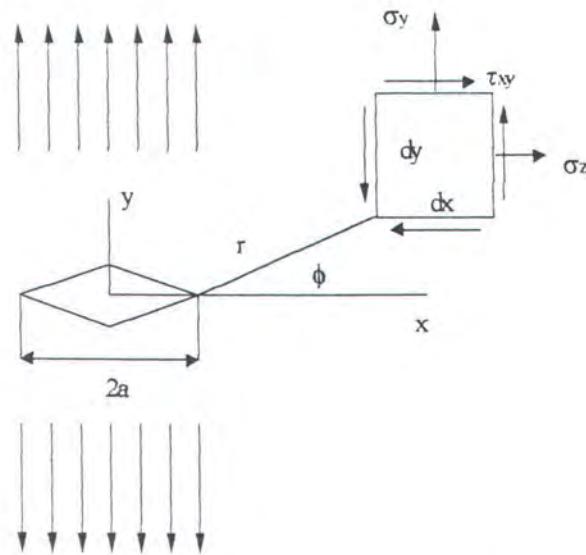
a = panjang retak.

Nilai K untuk bermacam-macam pembebanan dan konfigurasi dapat dihitung dengan memakai teori elastisitas, termasuk diantaranya secara perhitungan analitis dan numerik dengan metode penelitian. Faktor Intensitas Tegangan untuk bentuk retak, pembebanan dan konfigurasi umumnya memakai modifikasi dari persamaan diatas, seperti :

$$K = \sigma\sqrt{\pi.a} \quad \text{atau} \quad K = \sigma\sqrt{\pi.a} f(a/w) \quad \dots (2.2)$$

dimana a , $f(a/w)$ adalah parameter tanpa dimensi yang menunjukkan persamaan yang sedikit lebih kompleks.

Persamaan K diatas hanya berlaku untuk keadaan dimana ukuran daerah plastis diujung retak lebih kecil dibanding panjang retak. Sehingga Faktor Intensitas Tegangan dapat dipakai untuk menghitung kecepatan perambatan retak dan apabila terdapat dua retak dengan Faktor Intensitas Tegangan yang sama maka akan mempunyai kecepatan perambatan yang sama.



Gambar 2.4. Retak untuk pelat tak terbatas.

II.3.2. Fracture Toughness (K_{IC})

Fracture Toughness adalah suatu notasi yang menunjukkan ukuran untuk hambatan pertumbuhan retak. *Fracture toughness* disebut juga ketegaran perpatahan material, yang tergantung pada jenis material, temperatur, strain rate, lingkungan, ketebalan dan panjang retak. Apabila suatu bahan mampu bertahan terhadap retak dan mungkin menghambat pertumbuhan retak, maka bahan tersebut memiliki sifat rekayasa yang diinginkan. Dilain pihak, untuk bahan yang kekuatannya ditingkatkan umumnya mengalami kerapuhan yang berakibat turunnya kemampuan bahan untuk menghambat pertumbuhan retak, sehingga bila dikenai tegangan lebih besar, retak akan menjalar lebih cepat sehingga kegagalan lebih cepat terjadi [Schijve, 1982].

Ketegaran perpatahan merupakan nilai kritis dari K untuk kondisi retak yang terjadi tanpa adanya kenaikan beban atau energi yang diberikan. *Fracture Toughness* dituliskan dengan persamaan [Broek, 1984] :

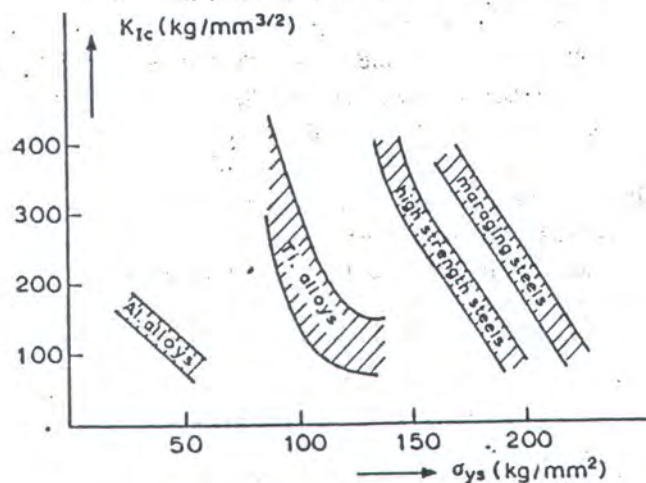
$$K_c = \sigma_c \sqrt{\pi \cdot a_c} f\left(\frac{a_c}{w}\right) \quad \dots (2.3)$$

dimana : σ_c = tegangan nominal yang dikenakan pada retak pada kondisi

tak tentu, dan

a_c = panjang retak pada kondisi tak tentu.

Tegangan luluh mempunyai pengaruh terhadap ketegaran perpatahan karena material yang memiliki tegangan luluh lebih tinggi umumnya memperlihatkan sifat *ductility* yang rendah. Dapat diasumsikan bahwa proses kenaikan tegangan luluh tidak berakibat terhadap kandungan partikel dalam material. Karena tegangan luluh yang tinggi, maka hanya dibutuhkan regangan plastis yang lebih kecil untuk mendapatkan tegangan pada partikel yang dipakai untuk mengawali kekosongan. Konsekuensinya kepecahan dapat timbul pada regangan yang lebih rendah [Rolfe, 1977]. Hubungan tegangan luluh dengan *fracture toughness* dapat dilihat pada gambar 2.5.



Gambar 2.5. Fracture Toughness sebagai fungsi σ yield.

II.3.3. Laju Perambatan Retak Menengah.

Formula untuk menghitung laju pertambahan retak diusulkan oleh Paris-Erdogan dengan menghubungkan da/dN dengan rentang Faktor Intensitas Tegangan oleh persamaan [Broek, 1984] :

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad \dots (2.4)$$

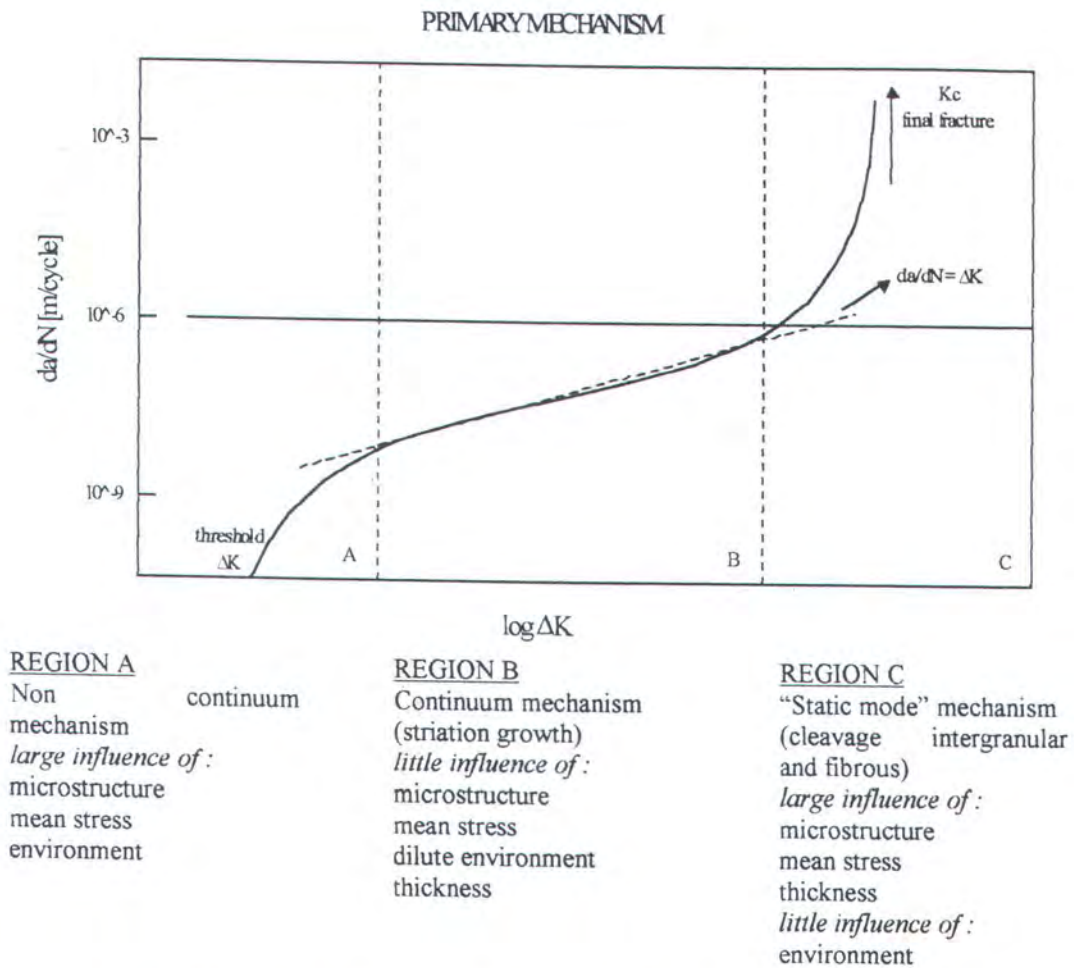
$$\Delta K = K_{maks} - K_{min}$$

Sejumlah data perambatan retak fatigue baik untuk material ferrous atau non ferrous telah didapat dengan pendekatan Paris-Erdogan. Dari pendekatan Faktor Intensitas Tegangan dapat memberikan analisa dari data percobaan yang dapat diaplikasikan terhadap beberapa masalah teknik. Dari penyelidikan lebih lanjut menunjukkan berdasarkan pada grafik logaritma perambatan retak fatigue da/dN dengan rentang Faktor Intensitas Tegangan, formula Paris-Erdogan hanya valid pada daerah tengah pada kecepatan perambatan retak yaitu antara $10^{-8} - 10^{-6}$ m/siklus atau $10^{-5} - 10^{-3}$ mm/siklus yaitu terletak pada daerah B dari diagram dibawah :

Variasi dari laju perambatan retak da/dN dengan ΔK adalah berbentuk signodial, dimana harga ΔK dibatasi oleh K_c dan threshold parameter. Pada harga ΔK yang tinggi, Paris-Erdogan menunjukkan gejala estimasi (daerah C), sedang untuk nilai ΔK rendah formula ini menjadi terlalu berlebihan.

Jadi, dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa formula Paris-Erdogan memberikan gambar yang bagus pada daerah laju perambatan retak menengah, sehingga dari data yang ada dapat diketahui jumlah siklus yang dibutuhkan untuk

merambatnya retak awal sampai dengan ukuran kritis yang dapat menimbulkan kegagalan.



Gambar 2.6. Diagram variasi signodial laju perambatan retak da/dN dengan SIF

Bila besar regangan geser sebanding dengan bukaan retak (*crack opening displacement*) pertambahan perambatan retak untuk tiap siklus dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\frac{da}{dN} = \beta \cdot \Delta(CTOD) = \beta \frac{\Delta K^2}{E \cdot \sigma_{cy}} \quad \dots (2.5)$$

dimana : E = modulus young,

σ_{cy} = tegangan yang bekerja,

β = efisiensi proses penumpulan, dan

CTOD = bukaan ujung retak.

Untuk model Laird Smith dan model penumpukan plastis yang berdasarkan pada teori *Crack Opening Displacement*, menghasilkan persamaan Paris dengan koefisien $m = 2$ (*Two Power Paris Equation*). Harga $m = 2$ didapat apabila kepecahan struktur diakibatkan oleh proses kepecahan mikro yang terjadi pada daerah dekat ujung retak yang panjangnya sebanding dengan CTOD dan merupakan model penumpukan ujung plastis.

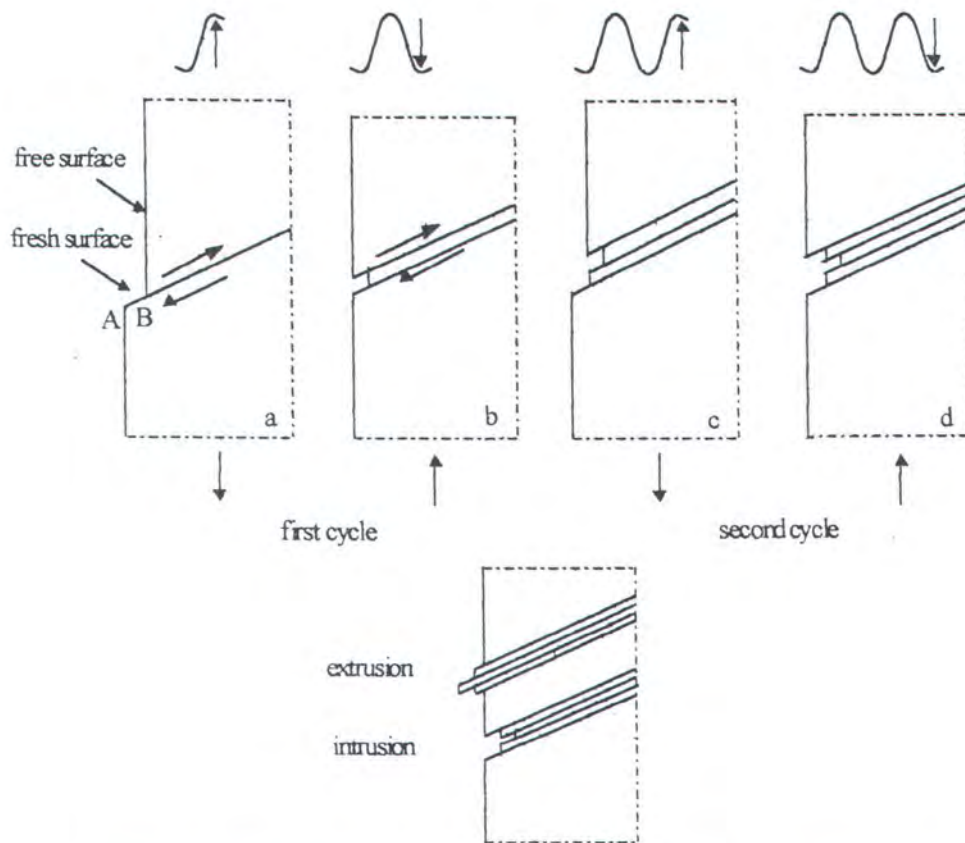
Teori perambatan retak yang berdasarkan pada kerusakan komulatif pada daerah plastis didepan ujung retak, menghasilkan koefisien $m = 4$. Harga ini didapat bila kepecahan disebabkan oleh suatu proses secara mikro.

II.4. MEKANISME KELELAHAN.

Mekanisme kelelahan diterangkan oleh Wood (1958) [Schijve, 1984], secara sederhana yang dapat menerangkan retak inti pada retak mikro yang pertama. Hal ini dapat dilihat pada gambar 2.7. Pembebanan ke arah atas pertama slip akan menghasilkan tahap permulaan, diikuti dengan pembebanan ke bawah akan menyebabkan penggelinciran pada arah yang berlawanan, tidak tepat pada bidang penggelinciran yang sama. Ada dua alasan mengapa tegangan geser pada daerah ini mengalami kenaikan. Pada level mikro terdapat konsentrasi tegangan geser dalam butiran pada bidang geser yang paralel. Ini ditunjukkan selama pembebanan ke atas yang pertama.

Mikroplastisitas dari pembebanan ke atas akan menimbulkan tegangan sisa mikro (*micro residual stress*) yang akan membantu untuk menyebabkan plastisitas terbalik (*reserved plasticity*) yang disebut efek Bauschinger lokal pada tingkat

mikro. Kita masih harus menjelaskan mengapa penggelinciran terbalik tidak muncul pada bidang penggelinciran yang sama.



Gambar 2.7. Model Wood untuk inisiasi retak mikro pada pita penggelinciran.

Bila hal itu terjadi, situasi tanpa kerusakan akan diperbaiki yang menyebabkan retak tidak terdeteksi. Dua alasan yang dapat disebutkan :

1. Pembalikan keadaan plastis melibatkan suatu pergerakan perpindahan dari sudut *strain-hardening*, ini adalah suatu keadaan yang tidak diharapkan atau dapat dikatakan suatu bidang yang telah mengalami slip sekali tidak dapat lagi mengalami slip kembali pada arah yang berlawanan sehubungan dengan *strain-hardening*.
2. Berhubungan dengan lingkungan, dimana penggelinciran pada tahap pertama menunjukkan material yang masih baru berhubungan dengan lingkungan.

Dan semua material secara teknis beroksidasi sangat cepat sekali dan lapisan-lapisan oksidasi menempel kuat pada base metal. Plastisitas terbalik menghendaki adanya lapisan tersebut dihilangkan, tetapi itu tidak terjadi dengan adanya pergeseran terbalik. Dalam keadaan vakum, alasan ini tidak dapat dipakai, meski pada keadaan itu fatigue masih mungkin terjadi. Gambar 2.7 c dan d menunjukkan pengulangan apa yang terjadi pada siklus pertama.

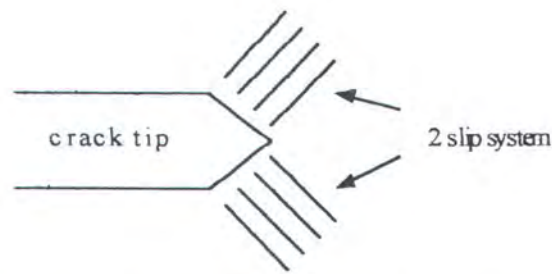
Retak mikro terbentuk sebagai suatu gangguan pada material.

Dari pemodelan ini menerangkan beberapa hal :

1. Retak inti dapat terjadi pada siklus pertama.
2. Perpanjangan dapat terjadi pada setiap siklus beban.
3. Bagian pertama dari perambatan retak mikro diharapkan terjadi sepanjang pita-pita penggelinciran.

II.4.1. Pertumbuhan Retak dan Striation.

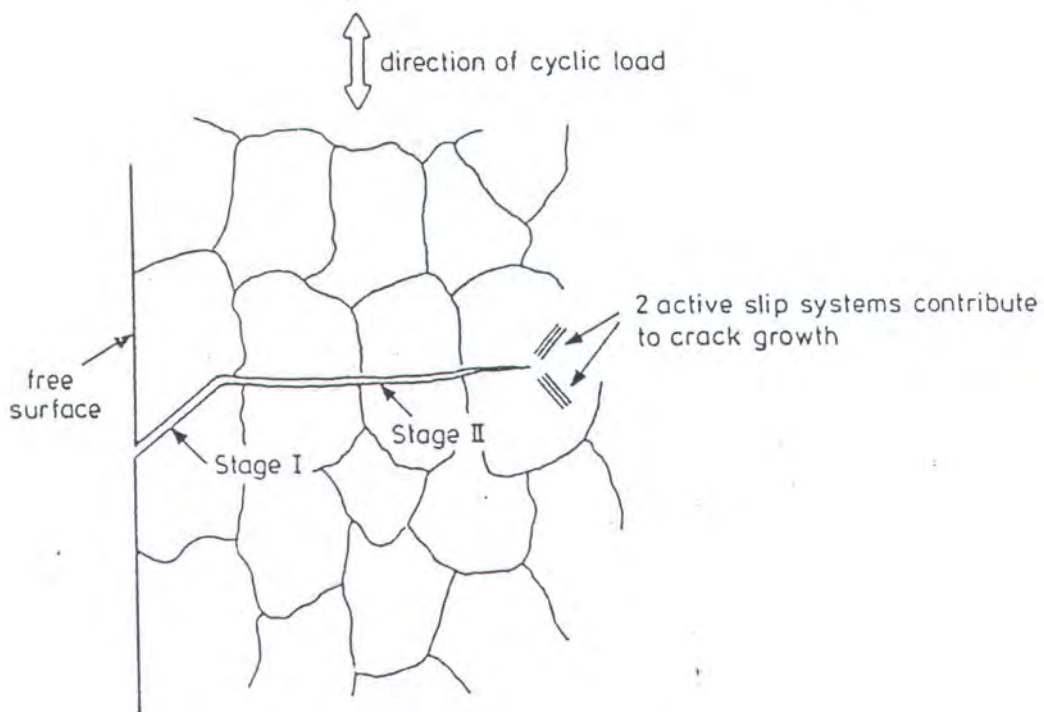
Pada tahap awal dari pertumbuhan retak, hambatan yang lebih rendah pada penggelinciran sebagai akibat adanya permukaan bebas disekitarnya yang akan meningkatkan retak pada pita penggelinciran untuk selang waktu tertentu. Setelah itu penetrasi ke dalam material dengan hambatan lebih rendah akan hilang, selebihnya intensitas tegangan akan naik pada ujung retak. Sebagai hasilnya diharapkan penggelinciran terjadi lebih dari atau bidang orientasi penggelinciran. Dan ini dapat dilihat pada gambar 2.8.



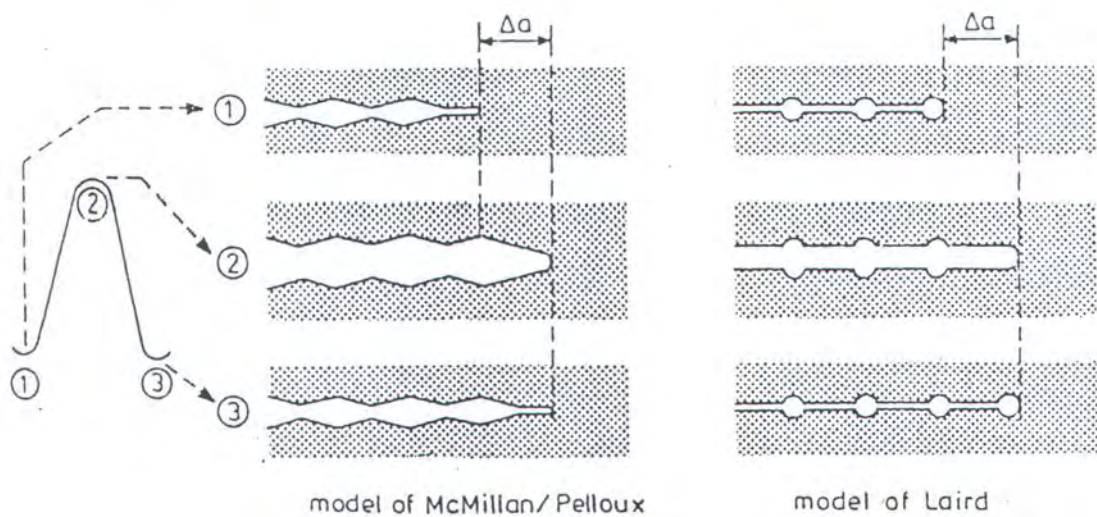
Gambar 2.8. Dua sistim kontribusi penggelinciran menuju bukaan retak pada cara yang sama menurut Wood.

Bahkan, bila 2 sistim penggelinciran yang berbeda aktif pada ujung retak, perpanjangan retak oleh langkah penggelinciran adalah mungkin. Dan retak akan bertambah ke arah orientasi dari kedua sistim tersebut, dan disebut pertumbuhan retak tahap II (gambar 2.9). Retak bagian depan yang menerus (*continous crack front*) adalah sebuah garis yang melewati sejumlah butiran yang berdekatan, dan selalu menuruti aturan tertentu dari arah perambatan pada butiran yang berdekatan sepanjang ujung retak.

Retak fatigue dapat merambat oleh suatu mekanisme penggelinciran balik. Beberapa tahap pertumbuhan retak fatigue ditunjukkan pada gambar 2.10. Retak tajam dalam bidang tarik menyebabkan konsentrasi tegangan lebih besar pada ujung retak dimana penggelinciran lebih mudah terjadi. Pada material ini, retak (tahap I dan tahap II) akan tergelincir sepanjang bidang slip pada arah tegangan geser maksimumnya. Sehingga retak akan terbuka sekaligus panjangnya bertambah dan penggelinciran akan terjadi pada bidang lain (tahap II). Hardening dan peningkatan tegangan akan mengaktifkan bidang slip sejajar lainnya, yang menyebabkan penumpulan ujung (tahap II). Siklus membuka dan menutupnya retak (tahap I – III) akan membentuk suatu pola yang dikenal dengan *striation*.



Gambar 2.9. Tahap pertumbuhan retak pada permukaan bebas dan penetrasi ke dalam material.



Gambar 2.10. Dua model untuk mikroplastisitas dan striation.

Dua model yang berbeda pada gambar 2.10 menunjukkan bagaimana perambatan retak, yang melibatkan proses penumpukan dan penajaman ulang ujung retak. Selama pembebanan, retak tersebut akan diperluas sehingga ujung retak menjadi tumpul. Selama tidak ada pembebanan selanjutnya, ujung retak

akan dipertajam kembali dan lebih kurang simetris atau dilipat dua satu sama lain. Kedua model pada level mikro meninggalkan tepi-tepi deformasi plastis pada permukaan kepecahan yang dikenal dengan *striation*, yang berhubungan dengan satu putaran.

II.4.2. Karakteristik dari Kelelahan-Kepecahan.

Alasan untuk mengetahui karakteristik kelelahan-kepecahan adalah :

- Untuk penafsiran hasil tes yang diperoleh dari percobaan, informasi yang dapat mendukung sering diperoleh dari penelitian tentang permukaan kepecahan.
- Untuk kegagalan yang terjadi selama masa operasi, analisa grafik kepecahan (*fracto-grafic*) adalah kunci utama untuk menemukan penyebab kegagalan.

Hal pertama yang dilakukan adalah membedakan karakteristik makro dan mikro. Karakteristik makro akan diperjelas terlebih dahulu karena dalam analisa kepecahan pengamatan terhadap permukaan kepecahan dimulai dengan mata telanjang dan dengan kaca pembesar.

A. Karakteristik Makro

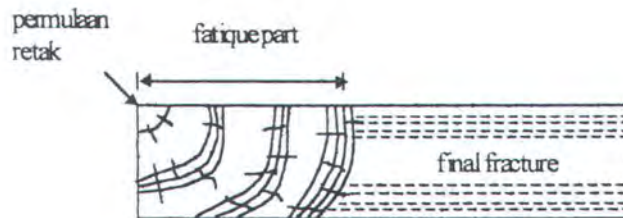
1. Tidak ada makroplastisitas dan permukaan datar.

Jika kegagalan kelelahan yang nyata disebabkan pertumbuhan retak kelelahan pada gambar 2.11, bagian ini disebabkan oleh kegagalan akhir.

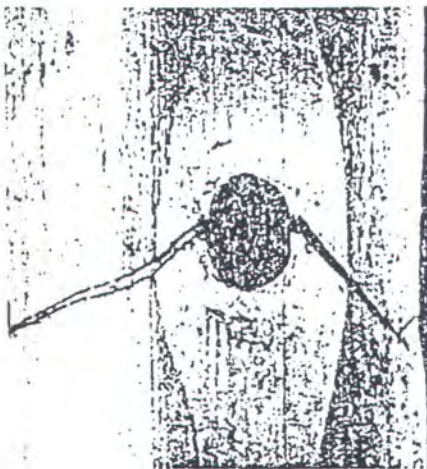
Hal ini adalah karakteristik bagian kelelahan tanpa adanya deformasi plastis praktis. Bagian kelelahan biasanya sangat datar, dimana kedua sisi komponen

yang cacat dapat disambung kembali, jika bagian akhir kegagalan tidak ada yang menghalangi. Pada gambar 2.12 diilustrasikan perbedaan kegagalan kelelahan dengan kegagalan statis.

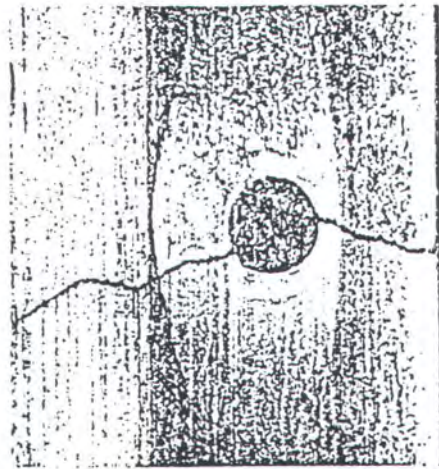
Dalam hal ini, tidak ada makroplastisitas karena pertumbuhan retak kelelahan adalah hasil mikroplastisitas. Lebih lanjut lagi, hal tersebut memiliki siklus alam dengan kecenderungan membalikkan deformasi.



Gambar 2.11. Dua bagian kegagalan dan kelelahan.



kegagalan statis



kegagalan fatik

Gambar 2.12. Perbandingan antara statis dan kegagalan fatik.

Konsekuensi dari tanpa adanya makroplastisitas adalah secara umum retak kegagalan sulit ditemukan. Observasi visual dalam inspeksi perawatan untuk

retak kegagalan sulit dilakukan. Hanya bila diketahui dimana letak retak dan melihat hal yang sama sebelumnya.

2. Pita-pita perambatan Konsentris (*Concentris Growth Bands*).

Pada gambar 2.15.c dan ditunjukkan pita-pita perambatan. Pita-pita tersebut juga ditunjukkan dengan adanya tanda-tanda *tide*, *beach*, *clam-shell* atau *oyster-shell*. Pita-pita tersebut mengindikasikan bagaimana retak menjalar. Perbedaan warna dihubungkan dengan berbagai variasi besarnya beban berulang. Derajat perbandingan dari korosi juga menimbulkan pita-pita, khususnya jika retak tidak ada perbandingan selama periode-periode tertentu.

3. Arah perambatan tegak lurus tegangan utama.

Dari pengalaman menunjukkan bahwa retak kelelahan menjalar dengan arah tegak lurus tegangan utama, untuk kecepatan perambatan yang tidak terlalu tinggi. Untuk beban tarik berulang arah perambatan akan tegak lurus arah pembebanan. Untuk beban torsi berulang arah perambatan akan membentuk sudut 45° dengan arah pembebanan yang menyebabkan perambatan retak spiral (gambar 2.14).

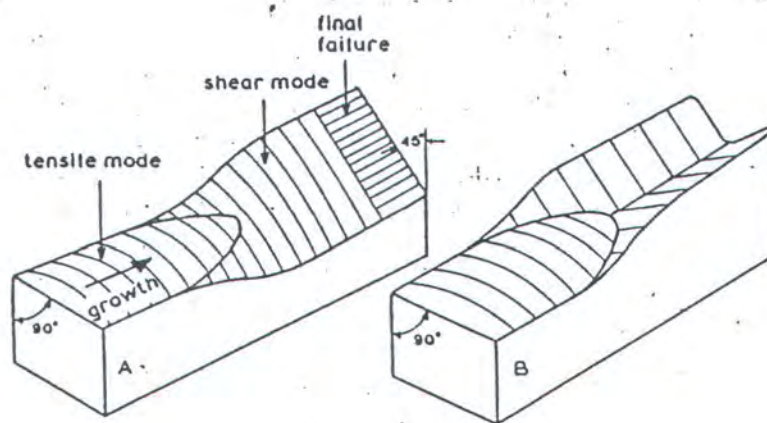
Jika retak kelelahan menjalar sangat cepat, sebagai contoh pada material yang tipis, sisi regangan dibentuk pada permukaan bebas dengan cara yang sama seperti retak statis lanjutan (*crack extension statis*). Lebar sisi regangan akan bertambah selama perambatan yang lebih cepat sampai menutupi tebal seluruhnya (gambar 2.13).

Arah pertumbuhan retak tetap tegak lurus arah perambatan. Transisi dari bentuk regangan mode I ke bentuk tegangan I/III adalah karakteristik untuk pertumbuhan retak kelelahan yang cepat pada material tipis. Pada gambar

2.12, sisi-sisi gaya geser adalah sejajar yang akhirnya menuju ke bentuk geser tunggal. Bagaimanapun juga jika dua sisi regangan membentuk sudut yang berlawanan ($+45^\circ$ dan -45°) yang menyebabkan kegagalan tegangan geser ganda.

4. Tahap-tahap radial dalam arah perambatan.

Kadang permukaan kepecahan menunjukkan langkah-langkah radial ke arah perambatan. Langkah-langkah seperti itu dapat berupa hasil merambatnya retak akibat guncangan ringan. Dalam segi kontinuitas, sebuah langkah harus terjadi pada dua tingkat yang berbeda.



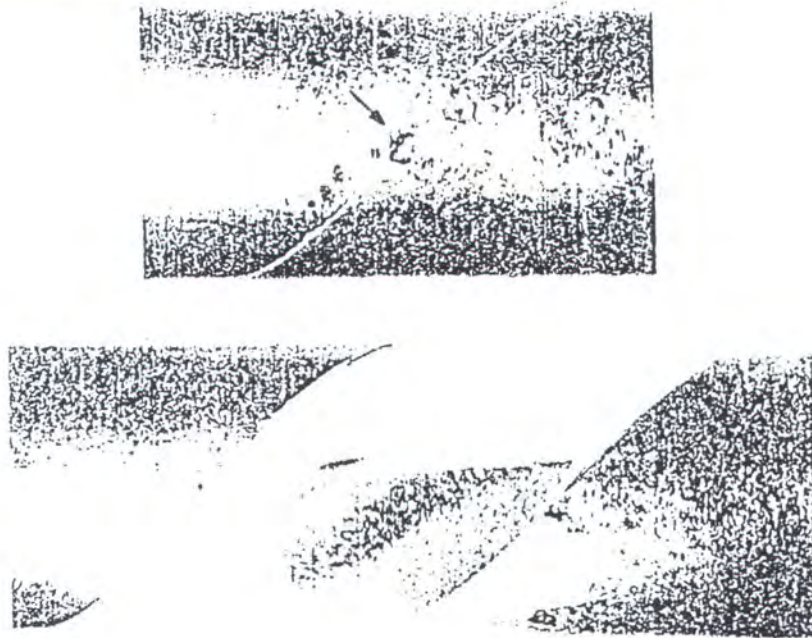
Gambar 2.13. Perpindahan Tensile Mode ke Shear Mode pada material pelat.

A. single shear B. double shear.

Seperti pada aluminium alloy tempa, jika terdapat deformasi struktur yang pasti. Hal ini berarti orientasinya tidak selalu acak bagi kisi-kisi kristal dari tiap butir (deformasi tekstur), melainkan akan menuju pada deviasi lokal yang kecil dari perambatan tegak lurus pada tegangan utama. Hasilnya adalah perambatan pada guncangan ringan dan langkah-langkah radial diantaranya. Secara umum langkah-langkah radial dan pita-pita perambatan akan memudahkan untuk menentukan titik dimana retak dimulai.

5. Jumlah dan ukuran retak makro.

Jika beban fatigue rendah, retak inti akan terjadi pada titik terlemah saja, namun bila beban cukup tinggi memungkinkan retak inti terjadi pada semua lokasi retak awal yang berpotensi. Dalam gambar 2.15.b mengilustrasikan salah satu retak yang dominan yang berhubungan dengan amplitudo tegangan tinggi. Gambar lain yang berhubungan adalah daerah bagian kelelahan. Untuk amplitudo tegangan yang lebih tinggi bagian tersebut lebih kecil karena jumlah maksimum dalam putaran terakhir dari umur kelelahan.



Gambar 2.14. Pertumbuhan retak kelelahan tegak lurus terhadap tegangan utama. Putaran torsi pada poros penggerak menyebabkan retak spiral. Retak berawal dari permukaan lubang.

B. Karakteristik Mikro.

1. Perambatan retak antar kristal.

Retak karena kelelahan pada material merambat antar kristal (dapat juga transgranular). Retak tersebut tidak mengikuti batasan butiran, berlawanan dengan *Stress Corrosion Cracking* dan perlahan-lahan gagal. Karena

perambatan retak merupakan konsekuensi dari langkah berulang, maka retak kelelahan merambat melalui butiran-butirannya. Hambatan pergeseran pada batas butir, minimum untuk sebuah retak antar kristal. Antar kristal alami dapat dengan mudah diamati dengan mikroskop optik.

2. Striation.

Dalam analisa kegagalan, karakteristik makro dan mikro yang bermacam-macam dapat lebih membantu. Biasanya tidak sulit membedakan antara retak kelelahan dengan retak karena korosi tegangan. Meskipun keduanya tidak menunjukkan makroplastisitas kadang-kadang kegagalan korosi tegangan menunjukkan ikatan perambatan.

Striation hanya ditemukan pada kelelahan dan kepecahan. Harus diperhatikan bahwa tidak adanya *striation* tidak terlalu menjelaskan apakah yang terjadi bukan retak kelelahan dan tidak semua material menunjukkan *striation*. Lebih jauh lagi untuk mengetahui *striation* tergantung pada kecepatan perambatan retak. Pada kecepatan perambatan yang rendah jarak *striation* mungkin terlalu kecil untuk diamati. Perbedaan paling mendasar adalah pergerakan antar kristal alami dari retak kelelahan dengan retak karena korosi tegangan. Akhirnya struktur serat mempengaruhi jalur kecil pada retak karena korosi tegangan, tetapi sukar mempengaruhi arah perambatan retak kelelahan.

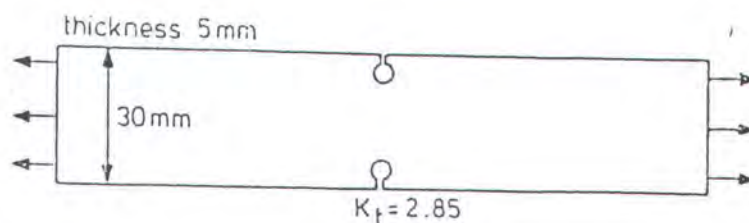


Fig. a. Specimens with side notches. Material 2024-T3.

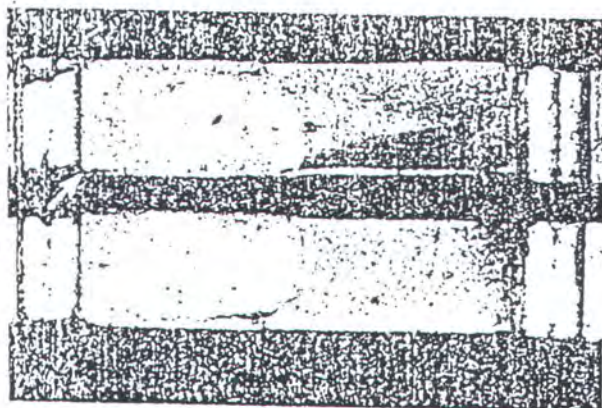


Figure b: Fracture surface with large fatigue part. Only one nucleus (arrow). Low σ_a (64 N/mm^2), high endurance ($N \sim 10^6$).

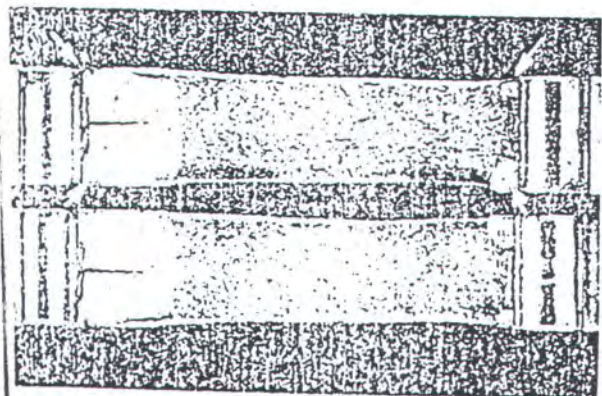


Figure c: Fracture surface with smaller fatigue part. Four nuclei (arrows). Higher σ_a (103 N/mm^2), lower endurance ($N = 0.2 \times 10^6$).



← ridge due to overlapping cracks

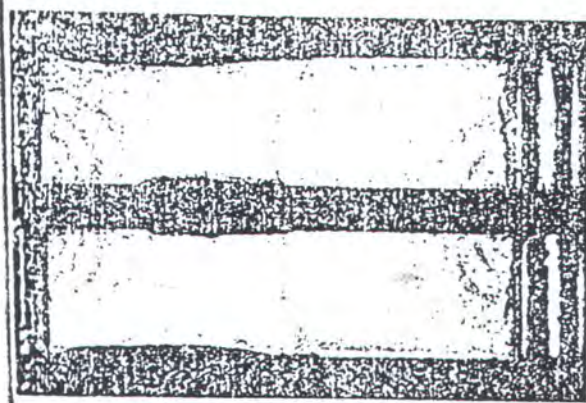


Fig. d: Fracture surface with growth bands, due to alternating low and high σ_a . (low: $\sigma_a = 64 \text{ N/mm}^2$, 60000 cycles: high $\sigma_a = 103 \text{ N/mm}^2$, 9000 cycles).

Gambar 2.15. Permukaan kepecahan benda uji bertakik.



BAB III

KOROSI

BAB III

KOROSI

III.1. PENDAHULUAN.

Adanya lingkungan korosif dan tegangan yang mengenai suatu struktur akan menyebabkan suatu kegagalan struktur. Kegagalan yang terjadi ini tergantung dari bentuk pembebanan, untuk pembebanan statis maka akan terjadi suatu kegagalan yang disebut *Stress Corrosion Cracking*.

Dalam bab ini akan dijelaskan aspek korosi yang mempengaruhi mekanisme kegagalan suatu material dalam lingkungan korosif, sehingga dapat diketahui mekanisme korosi itu sendiri dalam material.

III.2. TEORI DASAR KOROSI.

Secara umum korosi diartikan sebagai suatu proses kerusakan atau keausan material akibat terjadinya reaksi dengan lingkungan, yang didukung oleh faktor-faktor tertentu. Lingkungan yang menyebabkan kerusakan pada material disebut lingkungan korosif yang terbagi dalam beberapa bagian [Fontana, 1987] :

- lingkungan udara beruap air, destilasi bergaram dan air mineral,
- polutan industri yang terdiri dari uap air, gas-gas seperti amoniak, hidrogen sulfida, klorin, asam-asam organik,
- minyak, dan
- lingkungan bersuhu tinggi.

Tiap logam maupun paduannya yang bercampur dan bereaksi dalam suatu lingkungan korosif akan dipengaruhi oleh faktor-faktor berikut :

1. Struktur material.

Homogenitas struktur suatu material ditentukan oleh susunan kimia, perlakuan panas dan perlakuan mekanis dari material.

Pekerjaan mekanis akan menyebabkan susunan kristal dalam material akan berubah, sehingga apabila logam berada dalam larutan elektrolit akan terjadi aliran listrik karena sebagian kristal akan menjadi katode bagi kristal lainnya.

2. Deformasi plastis dan deformasi elastis.

Adanya deformasi baik plastis maupun elastis akan meningkatkan *free energy* sehingga ketahanan logam terhadap korosi berkurang. Pada waktu pembuatan hampir semua logam terdeformasi, akibat pengerolan menyebabkan permukaan logam mempunyai struktur material yang sifatnya berbeda. Adanya struktur kristal permukaan yang berbeda inilah yang menyebabkan pengkaratan umumnya mengarah pada permukaan.

3. Bentuk permukaan logam.

Permukaan logam mempunyai struktur tersendiri mengenai keaktifannya membentuk lapisan oksida logam yang fungsinya menghambat pengkaratan.

4. Sifat-sifat elektrolit.

- Lapisan elektrolit yang berhubungan dengan logam

Susunan lapisan elektrolit yang berhubungan dengan logam mempunyai pengaruh pada difusi, hasil pengkaratan, kecepatan reaksi oksigen, jumlah ion yang dikehendaki untuk menutup permukaan logam, dan lain-lain.

- Sifat-sifat umum kimia dan fisika dari elektrolit.

Meliputi besarnya kemampuan menghantar listrik, jenis garam yang melarut atau oksida pada larutan elektrolit tersebut.

5. Gerakan elektrolit.

Gerakan elektrolit akan mempengaruhi kecepatan larutan anode dan mempercepat proses pengkaratan, selain itu gerakan elektrolit ini akan menimbulkan gaya gerak listrik.

III.3. PRINSIP DASAR TERJADINYA KOROSI.

Korosi terjadi akibat adanya reaksi reduksi dan oksidasi (redoks) antara material dan lingkungannya. Reaksi reduksi adalah reaksi yang menggunakan elektron dan reaksi oksidasi adalah reaksi yang menghasilkan elektron.

Proses elektrokimia pada suatu material yang berada dalam lingkungan korosif, secara umum dapat digambarkan sebagai berikut :

Reaksi pada anode, yaitu terjadinya oksidasi logam yang melepaskan elektron.



Reaksi pada katode, secara umum terdapat beberapa bentuk reaksi katode, yaitu :

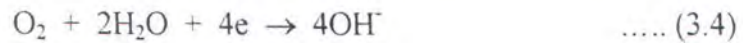
Evolusi hidrogen dengan reaksi :



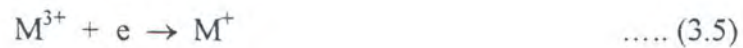
Reduksi oksigen (pada larutan-larutan asam) dengan reaksi :



Reduksi oksigen (pada larutan-larutan basa) dengan reaksi :



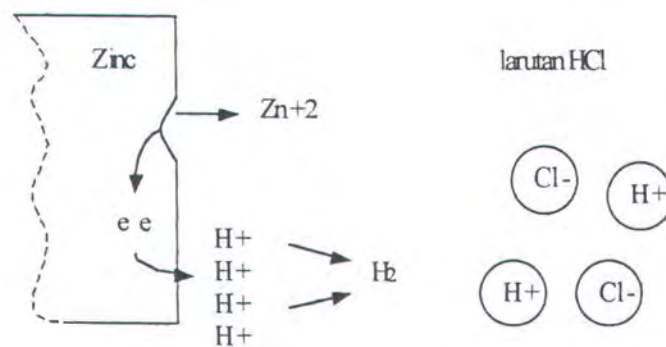
Reduksi ion logam dengan reaksi :



Metal deposition dengan reaksi :



Evolusi hidrogen adalah reaksi yang umum terjadi pada larutan yang berhubungan dengan udara yang mampu menghasilkan reaksi, sedang reaksi reduksi ion logam dan deposition adalah reaksi yang jarang terjadi, namun reaksi-reaksi diatas sama-sama menerima elektron. Reaksi oksidasi dan reduksi dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 3.1. Proses terjadinya korosi akibat kimia listrik.

III.4. FAKTOR PENYEBAB TERJADINYA KOROSI.

Faktor penyebab terjadinya korosi dapat dibagi menjadi 2 bagian yaitu sifat dari material dan faktor dari lingkungan dimana material itu berada.

III.4.1. Sifat Material.

1. Pengaruh susunan kimia material.

Semua logam (termasuk yang tahan karat seperti stainless steel, aluminium, dan sebagainya) cenderung akan mengalami pengkaratan oleh media korosif, seperti air laut.

2. Pengaruh struktur material.

Kurangnya homogenitas struktur dapat menimbulkan efek galvanis mikro pada material yang menyebabkan terjadinya pengkaratan. Adanya titik-titik yang tidak sama terhadap titik-titik disekitarnya akan menyebabkan salah satu bertindak sebagai katode dan yang lain sebagai anode. Perbedaan potensial akan menyebabkan terjadinya aliran elektrolit bila baja dimasukkan dalam air. Pada material yang mengalami deformasi berat lebih mudah terjadi korosi, karena butiran dalam material mengalami perubahan bentuk dan susunannya. Pada kondisi demikian material akan lebih reaktif dalam lingkungan yang elektrolit.

3. Pengaruh beda potensial (efek galvanis).

Bila dua logam mempunyai beda potensial tidak sama digabungkan dan dimasukkan dalam larutan elektrolit akan terjadi pengkaratan.

4. Pengaruh bentuk permukaan material.

Permukaan logam yang mempunyai bentuk tersendiri akan menyebabkan terjadinya korosi. Adanya *impurity* pada permukaan material akan menyebabkan korosi karena terperangkapnya oksigen dalam material.

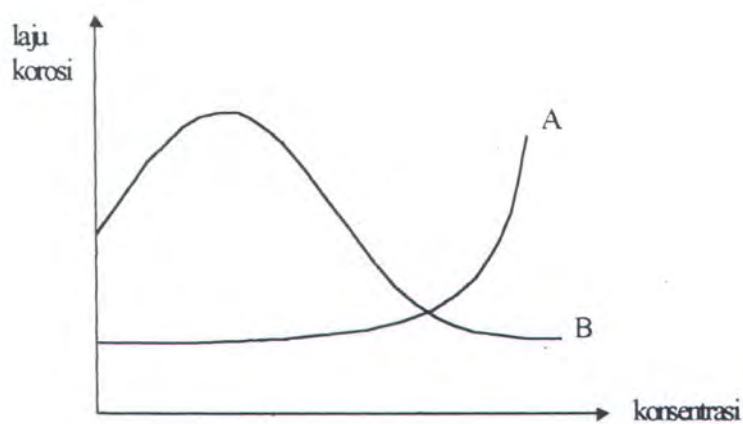
III.4.2. Faktor Lingkungan.

Lingkungan dimana benda konstruksi akan dibuat atau digunakan juga merupakan salah satu faktor dalam proses dan kecepatan korosi. Material

dilingkungan air laut akan sangat berbeda dengan dilingkungan air tawar. Korosi yang timbul akan dipengaruhi oleh media korosif yang terkandung pada lingkungan tersebut.

Lingkungan adalah faktor yang penting dalam proses korosi. Dalam hal ini yang ditinjau adalah aspek lingkungan larutan kimia, yaitu larutan amonium (amoniak). Untuk larutan kimia, hal yang sangat berpengaruh adalah tinggi rendahnya konsentrasi larutan tersebut. Secara teoritis maka pengaruh konsentrasi ini dapat menimbulkan karakteristik berbeda antara kedua benda konstruksi yang dapat dilihat pada gambar 3.2.

Kurva A menunjukkan bahwa jika konsentrasi korosif ditambah maka kecepatan korosi akan bertambah pada kondisi tertentu. Namun demikian, ada beberapa material yang jika konsentrasi korosif ditambah maka dengan secara tiba-tiba kecepatan korosi akan bertambah juga. Dengan konsentrasi yang tinggi berarti kapasitas ion dan atom juga banyak sehingga kecepatan korosi secara langsung akan bertambah.



Gambar 3.2. Pengaruh konsentrasi larutan terhadap laju korosi.



BAB IV

STRESS CORROSION CRACKING

BAB IV

STRESS CORROSION CRACKING

IV.1. PENDAHULUAN.

Dipenghujung abad ke-19, penjajahan Inggris terhadap India mencapai puncaknya. Pasukan infantri, artileri, dan kavaleri sangat kuat, lengkap dengan dukungan persenjataan dan amunisi yang baik.

Pada musim penghujan, kegiatan militer dikurangi dan amunisi disimpan dalam gudang dekat kandang kuda sampai cuaca membaik. Namun setelah cuaca membaik, timbul suatu masalah dimana ditemukan banyaknya peluru yang tidak dapat dipakai kembali karena selongsong kuningannya retak.

Pada tahun 1921, barulah persoalan itu menjadi jelas ketika penelitian yang dilakukan dengan cara konvensional, Moore, Beckinsae, dan Mallinson menemukan bahwa tegangan sisa telah menyebabkan keretakan pada selongsongan kuningan yang berada dalam lingkungan kimia tertentu. Mereka menyimpulkan bahwa tegangan sisa dari proses fabrikasi, digabung dengan amonia dari urine kuda telah menjadi penyebab peretakan selongsong peluru di India.

Dengan demikian orang menemukan satu bentuk korosi baru yang karena lingkungan tempat dijumpainya, mula-mula disebut peretakan musim (*season cracking*) namun selanjutnya disebut peretakan korosi tegangan (*stress corrosion cracking*).

IV.2. STRESS CORROSION CRACKING.

Stress Corrosion Cracking atau lebih lanjut akan disebut SCC, adalah keretakan yang terjadi akibat adanya tegangan tarik (statis) dan media korosif secara bersamaan [Schijve,1982]. Dalam mekanisme ini haruslah ada tegangan tarik yang mungkin terjadi saat komponen beroperasi atau tegangan yang sudah ada sejak tahap fabrikasi atau instalasi.

Satu ciri SCC yang sering terjadi adalah bahwa kasus demikian tidak dapat diduga datangnya. Seringkali, bahan yang dipilih karena ketahanannya terhadap korosi ternyata gagal pada tingkat tegangan jauh dibawah tegangan perpatahan normalnya. Jarang orang menemukan bukti yang jelas bahwa kegagalan ini dapat diramalkan dan karena ini dapat dialami oleh komponen-komponen yang tampaknya tidak menderita tegangan, namun ketika diperiksa kembali beberapa waktu kemudian ditemukan bahwa komponen-komponen itu tiba-tiba sudah rusak.

Brown menjabarkan ciri-ciri utama SCC [Trethewey, 1991] :

1. Tegangan tarik harus ada. SCC merupakan hasil kerja sama antara tegangan dengan korosi. Kalau salah satu saja dari unsur-unsur itu tidak ada, masalah tidak akan timbul. Tegangan mungkin saja terjadi ketika komponen sedang operasional. Tetapi mungkin juga komponen itu telah memilikinya sejak tahapan fabrikasi/instalasi.
2. Pada umumnya, paduan-paduan ternyata lebih rentan dibanding logam-logam murni, meskipun ada beberapa pengecualian, seperti tembaga.

3. Peretakan pada logam tertentu yang teramati hanya disebabkan oleh sedikit saja unsur kimia di lingkungannya dan unsur-unsur itu tidak perlu dalam konsentrasi dasar.
4. Bila tegangan tidak ada, paduan biasanya lembam terhadap unsur yang sama dalam lingkungan, yang semestinya menyebabkan peretakan.
5. Bahkan bila bahan bersifat mulur, SCC mempunyai penampakan seperti perpatahan rapuh.
6. Biasanya kita dapat menentukan tegangan ambang batas, dibawah tegangan itu SCC tidak akan terjadi.

Disamping ciri-ciri yang diberikan oleh Brown, sekarang jelas bahwa ada rentan potensial tertentu dimana SCC bisa terjadi atau tidak mungkin terjadi dan bahwa potensial korosi merupakan sesuatu yang penting.

Berikut beberapa faktor yang mempengaruhi timbulnya SCC :

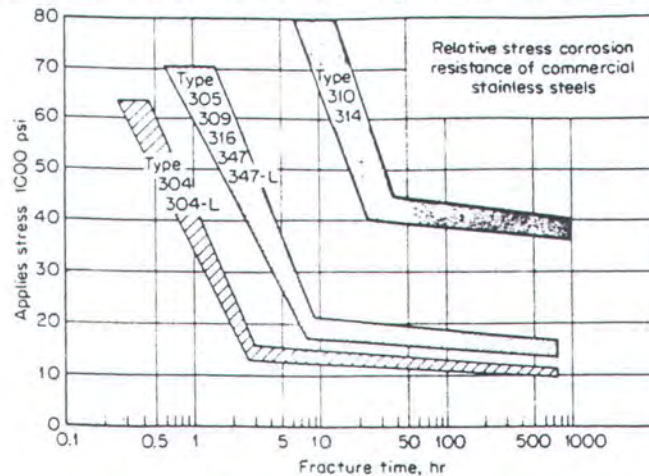
1. Efek tegangan.

Semakin tinggi tegangan yang diberikan maka waktu yang dibutuhkan untuk terjadi keretakan semakin turun. Ada suatu pendapat harus terdapat tegangan minimum untuk menghindari retak dimana besar tegangan ini tergantung pada komposisi paduan, temperatur dan kondisi lingkungan. Tegangan ini merupakan pembuka dari retak yang kemudian akan membuat tegangan menjadi maksimum pada ujung retak karena adanya peningkatan Stress Concentration Factor karena bentuknya yang tajam.

2. Waktu peretakan.

Variabel waktu adalah penting dalam fenomena retak korosi tegangan karena kerusakan fisik terjadi pada tahap-tahap akhir. Retak menembus material

mengurangi luas penampang lintang dan akhirnya akan terjadi kerusakan sehingga kecepatan retak bertambah dengan bertambahnya kedalaman retak.



Gambar 4.1. Kurva komposisi relatif ketahanan SCC

untuk stainless steel dalam 42% $MgCl_2$ [Fontana, 1987].

3. Faktor metalurgi.

Kerentanan SCC dipengaruhi oleh komposisi kimia, orientasi pemilihan butiran, distribusi dan komposisi percepatan interaksi dislokasi dan kemajuan transformasi fase (derajat metastabil). Faktor-faktor ini akan dipengaruhi kondisi lingkungan dan tegangan sehingga timbul SCC. Logam murni umumnya memiliki ketahanan terhadap retak korosi lebih baik sehingga sering dipakai untuk usaha mencegah terjadinya retak korosi ini.

IV.3. PROSES TERJADINYA KOROSI TEGANGAN.

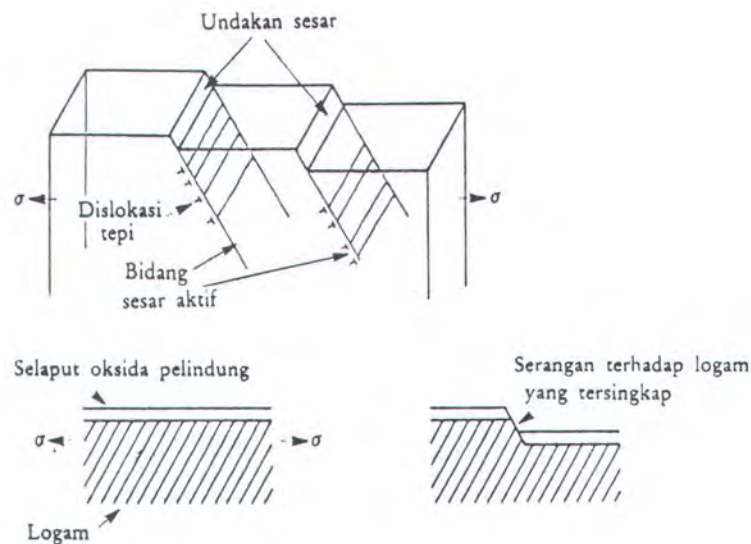
Proses korosi tegangan (*Stress Corrosion*) terbagi dalam dua tahap [Schijve, 1982] :

1. Tahap pemicuan (*Crack Nucleation Period*).
2. Tahap penjaralan retak (*Crack Propagation Period*).

IV.3.1. Tahap Pemicuan.

Dalam tahap pemicuan, korosi memegang faktor besar. Korosi diawali pada permukaan material yang dikenal dengan dengan korosi basah. Perbedaan potensial pada material tersebut akan menimbulkan reaksi anodik dan katodik. Banyak perbedaan potensial terjadi pada tingkat mikro, terutama pada daerah batas butiran yang dapat menimbulkan perbedaan potensial dari matrik potensial material dari butiran. Beda potensial dapat juga disebabkan oleh variasi elektrolit (kandungan O_2). Ini diperkirakan terjadi pada korosi crevice dan korosi pitting. Pada permukaan yang seharusnya dalam kondisi halus kini telah terbentuk cacat-cacat lokal. Hal ini terjadi akibat adanya mekanisme tegangan yang melebihi tahanan luluh bahan menyebabkan deformasi plastis. Pada kondisi seperti ini ikatan-ikatan struktur logam terputus sehingga logam berubah bentuk secara permanen. Mekanisme ini disebut mekanisme pembentukan atau dislokasi yang terus berlanjut hingga mencapai batas bahan. Cacat-cacat lokal ini disebut undakan sesar (*slip step*) dan merupakan bagian yang rentan terhadap korosi. Dimana selaput tipis oksida korosi atau bahan pelindung lain akan tersingkap sehingga bagian ini akan menjadi lebih anodik dibanding sekelilingnya.

Korosi adalah proses yang kompleks, yang banyak dipengaruhi tipe material, struktur material dan lingkungan. Dalam tahap pemicuan ini korosi adalah proses dasar, tetapi pada tingkat mikro penembusan korosi pada material telah terjadi. Dalam banyak kasus ini terjadi sepanjang batas butiran. Dipercayai pada tahap pemicuan ini pengaruh dari tegangan tarik tidaklah besar. Bagaimanapun tegangan ini berpengaruh terhadap potensial listrik dalam material.



Gambar 4.2. Peran utama *slip step* dalam peretakan peka lingkungan.

Setelah serangan korosi mencapai tahap *notch macroscopical*, ada perbedaan situasi :

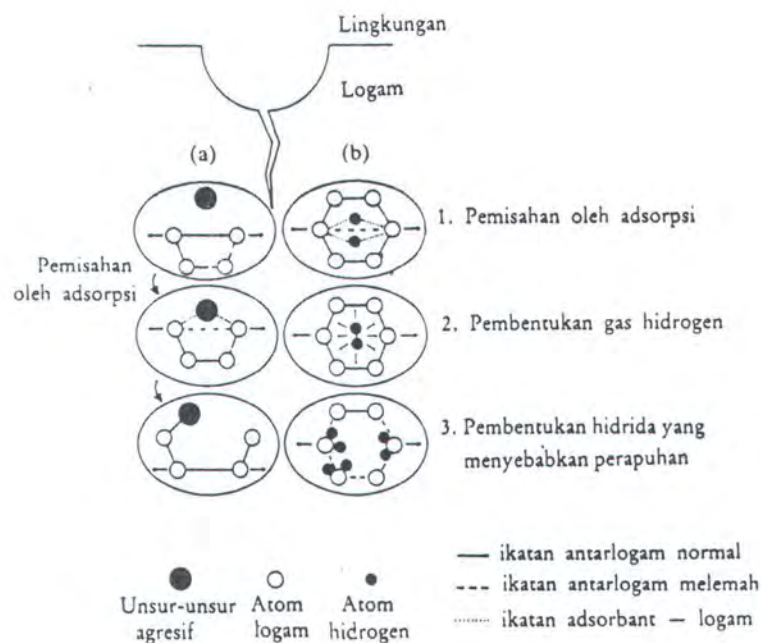
- *Micronotch* akan menghasilkan konsentrasi tegangan pada ujungnya. Ini dapat mengubah potensial anodik pada ujung yang mempercepat korosi lokal. Tegangan tarik kemudian menjadi penting.
- Tegangan tarik akan membuka *miconotch* yang memberikan jalan pada elektrolit. Takik dapat berfungsi sebagai crevice yang kemudian membuat korosi sebagai kondisi yang tidak menguntungkan.

IV.3.2. Tahap Penjalaran Retak.

Jika kondisi tersebut ada, korosi permukaan atau dasar akan diproses untuk penembusan lebih dalam terhadap material dan periode penjalaran retak dimulai.

Tegangan tarik adalah penting, karena akan mempercepat retak pada tingkat lebih tinggi. Tegangan tarik membuka retak dan memberi kesempatan elektrolit masuk sampai pada ujung retak. Tegangan tarik juga dapat menyebabkan beberapa kekenyalan yang akan memperbesar sifat anodik material. Kontribusi utama dari tegangan tarik adalah untuk meningkatkan kecepatan perambatan retak. Ini tidak sepenuhnya menjelaskan bagaimana tegangan tarik mempercepat mekanisme pertumbuhan retak. Dalam beberapa material retak korosi tegangan tumbuh lebih atau kurang kontinu, tapi pada material lain kadang nampak terjadi lompatan kecil. Bagaimanapun juga tegangan tarik menunjukkan konsentrasi energi regangan pada ujung retak dan energi ini akan mendorong proses *decohesion*.

Mekanisme yang menunjukkan unsur-unsur aktif dalam elektrolit yang dapat menurunkan integritas mekanik bagian ujung retak, sehingga memudahkan pemutusan ikatan-ikatan struktur dalam material. Mekanisme ini disebut mekanisme absorpsi.



Gambar 4.3. Mekanisme absorpsi oleh ion hidrogen.

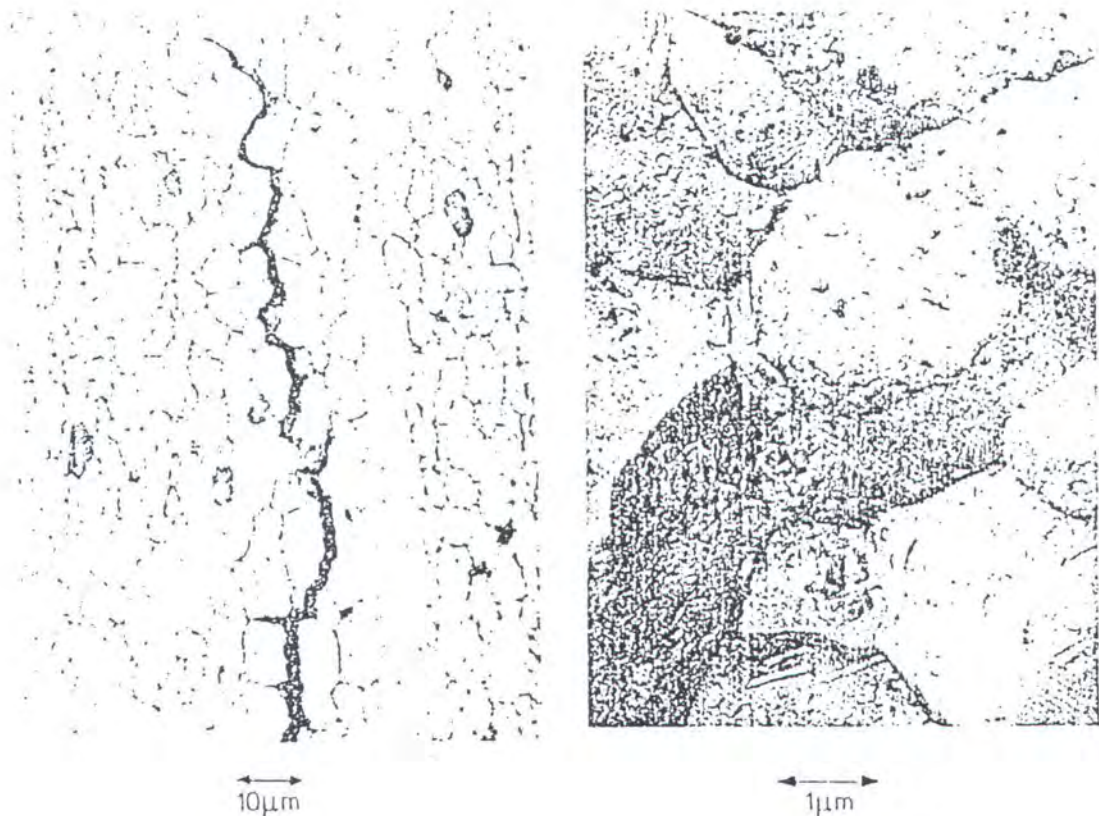
Ion-ion agresif yang spesifik untuk tiap kasus diperkirakan mengurangi kekuatan ikatan antar atom diujung retakan dan mengakibatkan terjadinya ikatan antara logam dengan unsur agresif tadi. Energi yang dipakai untuk pengikatan atom logam dengan atom agresor tadi mengurangi energi ikatan antar atom logam sehingga pemisahan secara mekanik lebih mudah terjadi. Ion spesifik tersebut, yang dalam keadaan normal tidak reaktif, menjadi lebih reaktif karena meningkatnya energi termodinamik antara ikatan-ikatan logam akibat tegangan tarik.

IV.4. GAMBARAN MIKROSKOPIK DAN MAKROSKOPIK SCC.

Pada awal mikroskopik SCC terjadi sepanjang batas butiran dalam beberapa struktur material. Khususnya untuk aluminium alloys dan baja paduan rendah kekuatan tinggi (terutama *austenite grain boundaries*). Sebagai contoh dari retak intergranular ditunjukkan pada gambar 4.4.a, dimana hubungan ini tersingkap baik dengan mikroskop optik (potongan melintang) dan mikroskop elektron (relika dari permukaan patah). Gambaran mikroskopik kedua adalah ujung retak bercabang (*crack tip branching*). Tumbuh disekitar butiran retak akan bertemu dalam 3 titik. Kemudian pertumbuhan dapat terjadi dalam dua arah, sampai salah satu yang terbesar menjadi dominan. Sedang pertumbuhan retak yang lebih pendek akan terhenti karena tidak bertambah panjang dibawah tegangan. Pertumbuhan retak transgranular terjadi pada beberapa material, misalnya pada stainless steel dan Ti-alloy.

SCC dapat terjadi pada tingkat tegangan yang rendah. Sebagai akibat biasanya terjadi tanpa adanya deformasi plastik makroskopik. Seperti ditunjukkan

pada gambar 4.4.b, retak dapat menjadi sangat panjang dan kadang terjadi kegagalan yang sempurna. Dalam kasus lain retak korosi tegangan membebaskan tegangan tarik, sebagai contoh jika hal tersebut adalah tegangan dalam dari material (*residual stress*).



Gambar 4.4.a. Ujung retak pada mikroskop (900 x). *Intergranular Crack Growth*.

4.4.b. Permukaan patah pada mikroskop elektron (14000 x). *Grain Boundary Facets*.

Banyak retak korosi tegangan terjadi pada aluminium alloy tempa dan tuang. Material ini umumnya mempunyai struktur serat yang jelas. SCC tumbuh relatif mudah pada arah serat tersebut. Ketahanan retak korosi untuk suatu tegangan tarik yang tegak lurus arah serat lebih rendah bila dibanding tegangan tarik searah serat. Ketahanan retak korosi adalah anisotropik untuk pertumbuhan

retak sepanjang batas butiran jalannya lebih mudah apabila jalannya lurus dalam arah serat. Dalam arah melintang jalan yang zig-zag akan membuat pertumbuhan retak lebih sulit.

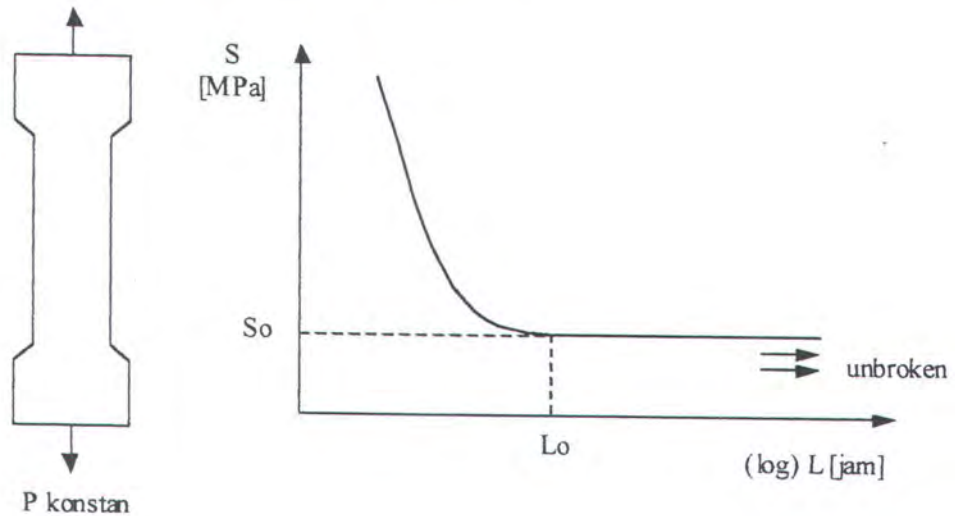
IV.5. STRESS CORROSION TEST , VARIABEL DAN TUJUAN

PENGETESAN.

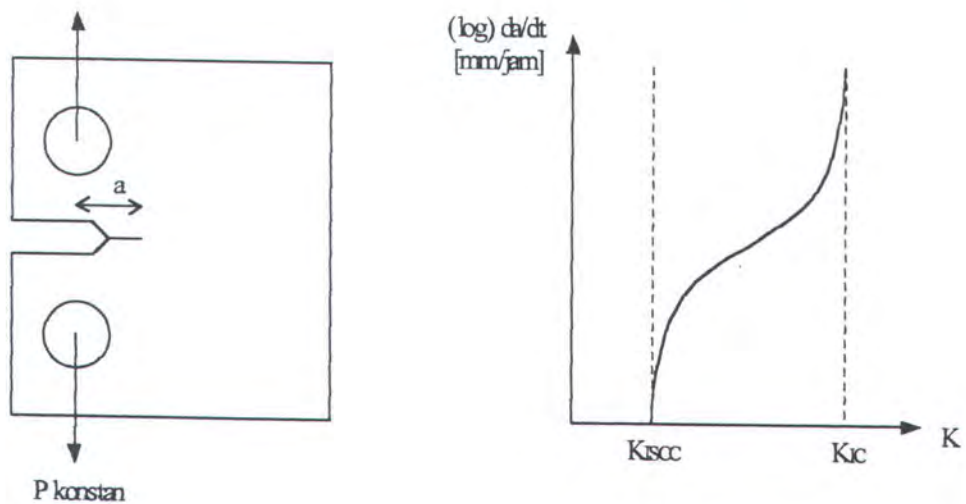
Dua cara berbeda dari penggambaran hasil SCC ditunjukkan pada gambar 4.5 dan 4.6. Pada gambar 4.5, suatu spesimen tanpa takikan diberikan suatu beban konstan dalam lingkungan korosif untuk mengukur *stress corrosion life*. Umur dari struktur diplotkan terhadap fungsi tegangan yang dipakai. Kesamaan dengan kurva fatigue terdapat batas terendah (σ_0) dimana kegagalan karena korosi tegangan tidak terjadi. Nilai *threshold* dipertimbangkan sebagai karakteristik untuk kombinasi material dan lingkungan tertentu. Umumnya kurva σ -L menunjukkan pembelokan mendadak terhadap asintot horisontal σ_0 . Usia (L_0) terjadi dalam variasi yang cukup beragam, bisa 10 jam atau untuk lingkungan yang kurang agresif bisa mencapai 1000 jam.

Pada gambar 4.6, spesimen *Compat Tension* (CT) yang diberi retak awal diberi beban konstan, kecepatan pertumbuhan retak da/dN dihitung dan diplotkan sebagai fungsi dari faktor intensitas tegangan (SIF), K. Harga K yang lebih besar diharapkan akan memberikan laju retak yang lebih tinggi. Harga K_{ISCC} adalah harga K minimum yang diperlukan untuk pertumbuhan SCC yang mengacu pada mode I. Hal ini dianggap sebagai karakteristik untuk kombinasi spesifik material lingkungan.

Harga kedua K_I dihubungkan dengan kegagalan statis. Harga-harga ini memiliki kecenderungan terhadap tanjakan horisontal dari kurva da/dN . Pada kemiringan ini nilai da/dN tidak tergantung pada K . Pertumbuhan retak pada daerah ini dipercayai sebagai proses embritling kimia yang membutuhkan waktu yang tidak tergantung pada intensitas tegangan.



Gambar 4.5. Hasil pengujian *Stress Corrosion Life*.



Gambar 4.6. Hasil pengujian retak korosi tegangan (SCC).

Terdapat dua macam tipe pengujian yang berbeda :

1. pengujian yang melibatkan periode nukleasi (*nucleation period*).
2. pengujian pada spesimen dengan retak awal, yang menghilangkan periode nuklesi.

Dalam pengujian ini hanya pertumbuhan SCC saja yang dipertimbangkan. Ada beberapa variabel yang dihubungkan dengan material dan lingkungan, antara lain

:

- Material : - tipe alloy dan perlakuan panas.
- struktur material, misalnya arah serat dan sebagainya.
- Lingkungan : - tipe lingkungan : gas, basah/larutan.
- tipe *exposure* : - kontinu (diudara terbuka, dalam larutan).
- terputus (basah dan kering bergantian)
- temperatur.

Ternyata yang mempengaruhi sifat retak korosi sangat banyak. Oleh karena itu harus dipertimbangkan secara sungguh-sungguh jenis informasi apa yang dikehendaki. Berikut beberapa kondisi lingkungan yang dapat diterapkan dalam pengujian, antara lain :

1. *Exposure* udara normal.
2. *Exposure* udara terbuka. (Penempatan spesimen yang bebas terhadap kontaminasi hujan, sinar matahari dan udara).
3. Pencelupan/perendaman penuh kedalam larutan tertentu.
4. Pencelupan berubah-ubah secara periodik (basah dan kering).
5. Salt spray cabinet (penyemprotan air laut).

Kondisi servis yang ekstrim dapat diperoleh pada *exposure* atmosfer dekat pesisir laut, namun untuk pengujiannya membutuhkan waktu yang lama. Percepatan pengujian dapat dilakukan dengan memberikan lingkungan yang lebih ekstrim, pencelupan yang berubah-ubah dan penyemprotan dapat memberikan kondisi yang ekstrim, dibandingkan dengan pencelupan penuh.

Selain penggunaan lingkungan yang lebih ekstrim, cara lain untuk mempercepat terjadinya retak adalah dengan memperbesar beban. Perkembangan yang menarik adalah tes dengan peningkatan beban secara perlahan selama tes akan menjamin kegagalan akan terjadi pada waktu yang tepat. Biasanya hal ini dilakukan dengan cara semacam itu sehingga peningkatan beban tetap memberikan strain rate konstan.

IV.6. ASPEK-ASPEK PRAKTIS SCC.

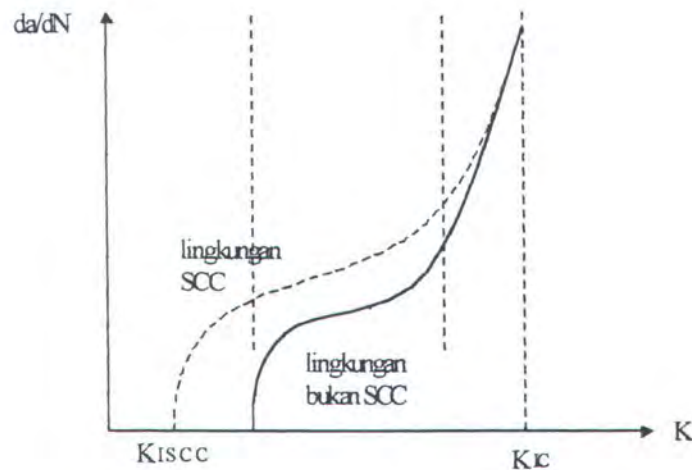
Peretakan korosi tegangan adalah gejala yang kompleks. Pengujian bahan yang rentan terhadap korosi tegangan memerlukan penahanan yang memadai terhadap semua faktor yang terlibat.

Suatu komponen yang berada dalam lingkungan korosif akan mengalami perambatan retak meskipun K_I yang terjadi lebih kecil dari K_{IC} . Lingkungan yang korosif akan mempercepat perambatan retak. Dalam perancangan fracture mechanics untuk kasus ini, perlu diketahui suatu batas harga K_I dimana retak mulai merambat. Oleh karena itu didefinisikan suatu besaran K_{ISCC} , dimana [Brodjonegoro, 1987] :

- $K_I < K_{ISCC}$, tidak terjadi kegagalan meskipun komponen berada dalam lingkungan korosif.

- $K_{ISCC} < K_I < K_{IC}$, terjadi perambatan retak akibat pembebanan dan lingkungan yang korosif.
- $K_I > K_{IC}$, terjadi kegagalan komponen.

Dalam bab yang terdahulu telah diperlihatkan grafik intensitas tegangan dengan laju perambatan retak dapat dipakai untuk menentukan sifat bahan yang dikenal sebagai ketegaran perpatahan. Jika pengujian dilakukan pada lingkungan yang menunjang SCC atau tidak, maka hasil pengujian dapat digambarkan seperti pada gambar 4.7.



Gambar 4.7. Pengujian kerentanan terhadap SCC melalui pengukuran laju pertumbuhan retak.

Data dari percobaan tersebut dapat dikategorikan menjadi 3 bagian :

1. Daerah A :

Pertumbuhan retak terkait erat dengan intensitas tegangan tetapi laju perambatan turun dengan cepat, hingga menjadi nol. Ekstrapolasi ini menunjukkan intensitas tegangan ambang batas (*K threshold*) dibawah nilai ini retak tidak akan terjadi.

2. Daerah B :

Ketergantungan pada intensitas tegangan kecil sekali, pertumbuhan retak berlangsung dengan kecepatan hampir konstan yang lebih cepat dari kecepatan perambatan pada lingkungan pembanding dan laju ini dikendalikan oleh korosi.

3. Daerah C :

Paksaan mekanik begitu besar sehingga pengaruh lingkungan kurang berperan. Perpatahan tergantung pada intensitas tegangan dan hampir sama dengan spesimen yang diuji pada lingkungan pembanding. Pertumbuhan retak mendekati harga ketegaran perpatahan, K_{IC} .

Dari grafik ini tampak bahwa untuk bahan yang rentan, laju pertumbuhan retak menunjukkan pergeseran yang umumnya naik dan berada disebelah kiri data dari lingkungan lembam. Saat harga faktor intensitas tegangan meningkat penyimpangan kedua kurva itu berkurang dan perilaku bahan mendekati perilaku perpatahan yang murni mekanik.



BAB V

PELAKSANAAN DAN HASIL

PENGUJIAN

BAB V

PELAKSANAAN DAN HASIL PENGUJIAN

V.1. PENDAHULUAN.

Untuk mengetahui tegangan luluh (σ_{yield}) dan tegangan patah ($\sigma_{ultimate}$) perlu dilakukan pengujian tarik material. Tegangan luluh dan tegangan patah perlu diketahui batas elastisitas material, sehingga beban dalam pengujian dinamis dapat direncanakan dengan mudah. Perencanaan beban untuk uji dinamis diperoleh dari kalibrasi yang dilakukan antara mesin uji tarik dengan mesin uji dinamis. Dengan hasil kalibrasi tersebut dapat dipakai sebagai patokan besarnya beban yang dipakai dalam pengujian dinamis.

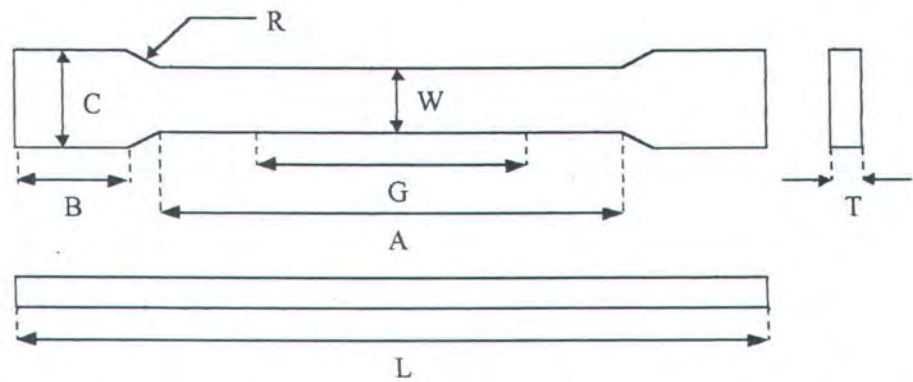
Dengan diketahuinya sifat dari uji tarik maka usia kelelahan dapat diperkirakan. Pengujian dilakukan dengan membandingkan antara material yang diuji pada kondisi normal dengan material yang disemprot dengan larutan amonia pada temperatur ruangan.

V.2. UKURAN SPESIMEN UJI.

Material spesimen uji yang dipakai dalam percobaan ini adalah aluminium type 5083 (Al-Mg 4,5-Mn). Untuk material spesimen uji dinamis yang dilas, digunakan elektrode type 5183 dimana elektrode tersebut diambil 2 jenis merek yang berbeda. Pengelasan dilakukan dengan MIG/GMAW.

V.2.1. Spesimen Uji Tarik.

Spesimen uji tarik berdasarkan ASTM E 8M-94a tipe *sheet*, tentang pengujian untuk mendapatkan *mechanical properties* dari material.



Bentuk dan ukuran spesimen uji tarik dapat dilihat pada gambar 5.1.

Gambar 5.1. Spesimen uji tarik.

	L	W	C	T	B	A	G	R (min)
I	19,975	12,50	21,50	6,50	50,00	75,00	50,00	12,50
II	20,000	12,50	21,50	6,50	50,00	75,00	50,00	12,50

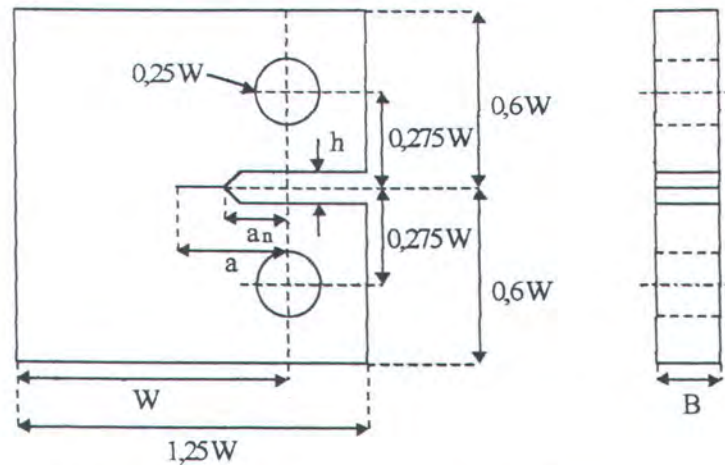
- Ukuran dalam milimeter

Tabel 5.1. Ukuran dari spesimen uji tarik.

V.2.2. Spesimen Uji Dinamis.

Spesimen uji dinamis berdasarkan ASTM E 647-93, tentang pengujian untuk perambatan retak kelelahan dengan memakai amplitudo konstan. Spesimen diambil dengan bentuk *Compact Tension (CT)* dengan retak awal ditepi. Bentuk dan ukuran spesimen uji dinamis dapat dilihat pada gambar 5.2.

Untuk menghindari adanya tegangan sisa akibat proses pembuatan spesimen, tiap spesimen diberi margin ± 3 mm. Kelebihan ini kemudian disekrap. Proses pembuatan dapat dilihat pada gambar 5.3.



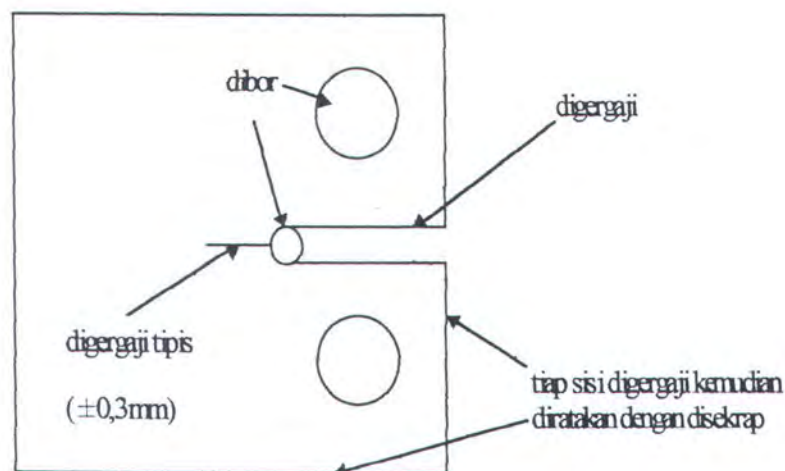
$$h = W/16 \text{ (maksimum)}$$

$$W/20 \leq B \leq W/4$$

$$a_n = 0,2 W \text{ (minimum)}$$

$$W = 25 \text{ mm (minimum)}$$

Gambar 5.2. Spesimen uji dinamis.



Gambar 5.3. Proses pembuatan spesimen uji dinamis.

Beberapa persyaratan yang ada dalam ASTM E 647-93, meskipun tidak semua persyaratan dapat dipenuhi karena keterbatasan alat dan kesulitan pembuatan. Persyaratan tersebut antara lain :

1. Model *Compact Tension Specimen* (CTS) direkomendasikan untuk pembebanan berulang *zero to tension*. Namun karena kesulitan dalam pengaturan beban, maka beban yang dipakai adalah beban berulang *tension to tension*.

2. Diameter lubang untuk tempat pin diubah ukurannya dari 0,25 W (25 mm) menjadi 0,2 W (20 mm) karena pin (mur-baut) yang tersedia berdiameter 20 mm. Perubahan ini dianggap tidak berarti karena selama pengujian pin masih dalam kondisi baik.
3. Takikan/*notch* (a) pada spesimen ini paling tidak berukuran 0,2 W. Dan untuk pengujian ini ukuran $a = 20$ mm.
4. Ketebalan benda uji (B) direkomendasikan pada range $W/20$ dan $W/4$. Tebal benda uji yang dipakai 6 mm, berarti masih berada dalam range 5 mm dan 25 mm.
5. Agar hasil dari metode pengujian ini valid, ukuran spesimen harus memenuhi rumus berikut :

$$W - a \geq 4/\pi (K_{\max} / \sigma_{ys}) \quad \dots (5.1)$$

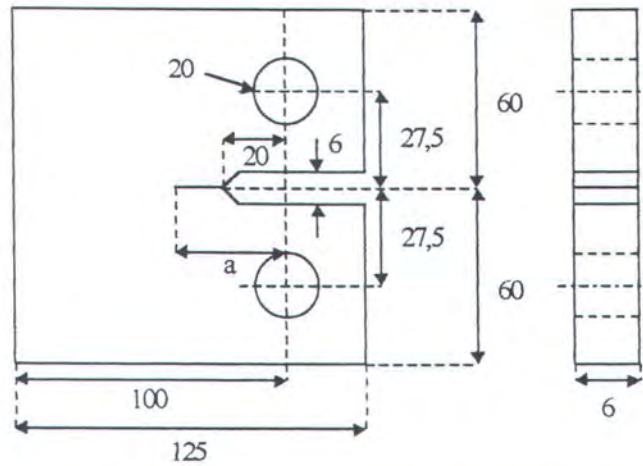
$W - a$ = lebar benda uji yang tidak retak,

σ_{ys} = 0,2% offset *yield strength*,

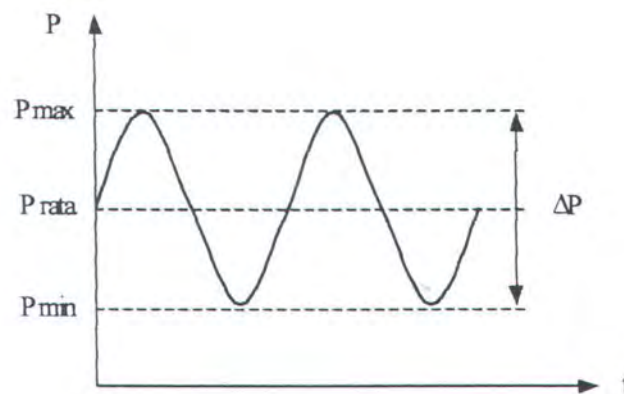
K_{\max} = nilai *stress intensity factor* yang terbesar dari pembebanan maksimum.

Rumus ini diberlakukan agar ukuran yang didapat masih dalam batas domain elastis dan hanya berlaku untuk kondisi temperatur tertentu dan tidak ada perubahan lingkungan. Karena dalam pengujian ini terdapat perubahan lingkungan maka rumus diatas tidak berlaku.

Model pembebanan yang diambil adalah bentuk sinusoidal, dapat dilihat pada gambar 5.5.



Gambar 5.4. Bentuk dan ukuran akhir spesimen uji dinamis (dalam mm).



$$R = \frac{P_{\max}}{P_{\min}} = \pm 0,2$$

Gambar 5.5. Model beban yang dipakai.

V.3. PELAKSANAAN PENGUJIAN.

V.3.1. Pengujian Tarik.

Pengujian tarik merupakan pengujian statis, dilakukan untuk mengetahui sifat mekanis dari material uji meliputi *yield stress*, *ultimate stress*, dan

Dalam pengujian diambil beban maksimum (pada strain indicator) ≈ 320 dan beban minimum ≈ 60 .

V.3.3. Persiapan dan Pelaksanaan Pengujian Dinamis.

Pengujian dinamis dilakukan untuk mengetahui pertambahan panjang retak tiap cycle tertentu. Dalam pengujian ini pertambahan retak diukur tiap 500 cycle, mengingat aluminium merupakan material yang getas (*brittle*) dimana penjaran retaknya cukup cepat.

Pengujian ini dilakukan dengan memakai amplitudo pembebanan konstan. Beban yang direncanakan adalah *zero to tension*, namun karena keterbatasan mesin maka beban yang dipakai adalah *tension to tension* dengan $R = \pm 0,2$. Frekuensi yang dipakai adalah 2 Hz, dimana frekuensi ini dianggap cukup ideal untuk menentukan besar beban maksimum dan minimum.

Setelah persiapan mengenai mesin dan spesimen uji sudah siap, maka pengujian dilakukan dengan 2 macam perlakuan. Pertama spesimen diuji pada kondisi normal (udara) dan kedua, spesimen disemprot dengan larutan amoniak 21%. Penyemprotan dilakukan tiap 500 cycle dan diarahkan pada retak buatan (notch) dan retak yang menjalar. Penyemprotan dilakukan dua sisi dari material, dengan harapan larutan amoniak benar-benar berpengaruh terhadap laju pertambahan retak dari spesimen uji. Pengujian berlangsung dalam suhu kamar.

Dalam pengukuran pertambahan panjang retak (Δa) dilakukan dengan bantuan *travelling microscope* yang letaknya disesuaikan dengan posisi dari retak awal. ASTM menyebutkan bahwa pertambahan retak harus sesuai dengan rumus berikut :

Dalam pengujian diambil beban maksimum (pada strain indicator) ≈ 320 dan beban minimum ≈ 60 .

V.3.3. Persiapan dan Pelaksanaan Pengujian Dinamis.

Pengujian dinamis dilakukan untuk mengetahui pertambahan panjang retak tiap cycle tertentu. Dalam pengujian ini pertambahan retak diukur tiap 500 cycle, mengingat aluminium merupakan material yang getas (*brittle*) dimana penjaran retaknya cukup cepat.

Pengujian ini dilakukan dengan memakai amplitudo pembebanan konstan. Beban yang direncanakan adalah *zero to tension*, namun karena keterbatasan mesin maka beban yang dipakai adalah *tension to tension* dengan $R = \pm 0,2$. Frekuensi yang dipakai adalah 2 Hz, dimana frekuensi ini dianggap cukup ideal untuk menentukan besar beban maksimum dan minimum.

Setelah persiapan mengenai mesin dan spesimen uji sudah siap, maka pengujian dilakukan dengan 2 macam perlakuan. Pertama spesimen diuji pada kondisi normal (udara) dan kedua, spesimen disemprot dengan larutan amoniak 21%. Penyemprotan dilakukan tiap 500 cycle dan diarahkan pada retak buatan (notch) dan retak yang menjalar. Penyemprotan dilakukan dua sisi dari material, dengan harapan larutan amoniak benar-benar berpengaruh terhadap laju pertambahan retak dari spesimen uji. Pengujian berlangsung dalam suhu kamar.

Dalam pengukuran pertambahan panjang retak (Δa) dilakukan dengan bantuan *travelling microscope* yang letaknya disesuaikan dengan posisi dari retak awal. ASTM menyebutkan bahwa pertambahan retak harus sesuai dengan rumus berikut :

Spesimen : A1

No.	Cycle	Strain Indicator		Beda Indicator	a [mm]	da [mm]	a rata [mm]
		max	min				
1	0				30,650		
2	1300	320	67	253	31,690	1,040	31,170
3	2000	318	68	250	32,020	0,330	31,855
4	2500	319	66	253	32,470	0,450	32,245
5	3000	321	67	254	32,830	0,360	32,650
6	3500	320	69	251	33,280	0,450	33,055
7	4000	319	67	252	33,720	0,440	33,500
8	4500	319	67	252	34,230	0,510	33,975
9	5000	319	67	252	34,715	0,485	34,473
10	5500	319	67	252	35,305	0,590	35,010
11	6000	319	67	252	35,840	0,535	35,573
12	6500	319	67	252	36,260	0,420	36,050
13	7000	319	67	252	36,950	0,690	36,605
14	7500	319	67	252	37,515	0,565	37,233
15	8000	319	67	252	38,255	0,740	37,885
16	8500	319	67	252	39,215	0,960	38,735
17	9000	319	67	252	39,885	0,670	39,550
18	9500	319	67	252	40,590	0,705	40,238
19	10000	319	67	252	41,600	1,010	41,095
20	10500	319	67	252	42,570	0,970	42,085
21	11000	319	67	252	43,750	1,180	43,160
22	11500	319	67	252	44,850	1,100	44,300
23	12000	319	67	252	46,480	1,630	45,665
24	12500	319	67	252	48,630	2,150	47,555
25	12855						patah

Tabel 5.3. Hasil pengujian spesimen A1

Spesimen : A1

No.	Cycle	Strain Indicator		Beda Indicator	a [mm]	da [mm]	a rata [mm]
		max	min				
1	0				30,650		
2	1300	320	67	253	31,690	1,040	31,170
3	2000	318	68	250	32,020	0,330	31,855
4	2500	319	66	253	32,470	0,450	32,245
5	3000	321	67	254	32,830	0,360	32,650
6	3500	320	69	251	33,280	0,450	33,055
7	4000	319	67	252	33,720	0,440	33,500
8	4500	319	67	252	34,230	0,510	33,975
9	5000	319	67	252	34,715	0,485	34,473
10	5500	319	67	252	35,305	0,590	35,010
11	6000	319	67	252	35,840	0,535	35,573
12	6500	319	67	252	36,260	0,420	36,050
13	7000	319	67	252	36,950	0,690	36,605
14	7500	319	67	252	37,515	0,565	37,233
15	8000	319	67	252	38,255	0,740	37,885
16	8500	319	67	252	39,215	0,960	38,735
17	9000	319	67	252	39,885	0,670	39,550
18	9500	319	67	252	40,590	0,705	40,238
19	10000	319	67	252	41,600	1,010	41,095
20	10500	319	67	252	42,570	0,970	42,085
21	11000	319	67	252	43,750	1,180	43,160
22	11500	319	67	252	44,850	1,100	44,300
23	12000	319	67	252	46,480	1,630	45,665
24	12500	319	67	252	48,630	2,150	47,555
25	12855						patah

Tabel 5.3. Hasil pengujian spesimen A1

Spesimen : A2

No.	Cycle	Strain Indicator		Beda Indicator	a [mm]	da [mm]	a rata [mm]
		max	min				
1	0				30,100		
2	1100	323	66	257	31,365	1,265	30,733
3	1500	323	66	257	31,705	0,340	31,535
4	2000	323	66	257	32,315	0,610	32,010
5	2500	323	66	257	32,735	0,420	32,525
6	3000	323	66	257	33,070	0,335	32,903
7	3500	323	66	257	33,640	0,570	33,355
8	4000	323	66	257	34,490	0,850	34,065
9	4500	323	66	257	35,640	1,150	35,065
10	5000	323	66	257	36,110	0,470	35,875
11	5500	323	66	257	36,840	0,730	36,475
12	6000	323	66	257	37,780	0,940	37,310
13	6500	323	66	257	39,525	1,745	38,653
14	7000	323	66	257	41,165	1,640	40,345
15	7500	323	66	257	43,215	2,050	42,190
16	8000	323	66	257	46,340	3,125	44,778
17	8539						patah

Tabel 5.4. Hasil pengujian spesimen A2

Spesimen : B1

No.	Cycle	Strain Indicator		Beda Indicator	a [mm]	da [mm]	a rata [mm]
		max	min				
1	0				30,650		
2	1400	318	68	250	31,820	1,170	31,235
3	2000	318	66	252	32,150	0,330	31,985
4	2500	319	67	252	32,555	0,405	32,353
5	3000	321	69	252	32,935	0,380	32,745
6	3500	320	70	250	33,365	0,430	33,150
7	4000	321	67	254	33,805	0,440	33,585
8	4500	321	69	252	34,335	0,530	34,070
9	5000	319	66	253	34,790	0,455	34,563
10	5500	319	68	251	35,420	0,630	35,105
11	6000	320	67	253	36,005	0,585	35,713
12	6500	320	66	254	36,735	0,730	36,370
13	7000	318	68	250	37,405	0,670	37,070
14	7500	320	66	254	37,950	0,545	37,678
15	8000	318	67	251	38,670	0,720	38,310
16	8500	322	70	252	39,495	0,825	39,083
17	9000	317	68	249	40,165	0,670	39,830
18	9500	319	66	253	41,070	0,905	40,618
19	10000	322	66	256	42,180	1,110	41,625
20	10500	319	66	253	43,220	1,040	42,700
21	11000	317	67	250	44,430	1,210	43,825
22	11500	321	67	254	46,050	1,620	45,240
23	12000	320	66	254	48,355	2,305	47,203
24	12330						patah

Tabel 5.5. Hasil pengujian spesimen B1

Spesimen : B2

No.	Cycle	Strain Indicator		Beda Indicator	a [mm]	da [mm]	a rata [mm]
		max	min				
1	0				29,200		
2	1200	320	68	252	30,300	1,100	29,750
3	1500	320	68	252	30,590	0,290	30,445
4	2000	320	68	252	30,950	0,360	30,770
5	2500	320	68	252	31,295	0,345	31,123
6	3000	320	68	252	31,755	0,460	31,525
7	3500	320	68	252	32,265	0,510	32,010
8	4000	320	68	252	32,960	0,695	32,613
9	4500	320	68	252	33,595	0,635	33,278
10	5000	320	68	252	34,305	0,710	33,950
11	5500	320	68	252	35,120	0,815	34,713
12	6000	320	68	252	35,870	0,750	35,495
13	6500	320	68	252	36,915	1,045	36,393
14	7000	320	68	252	37,785	0,870	37,350
15	7500	320	68	252	38,915	1,130	38,350
16	8000	320	68	252	40,555	1,640	39,735
17	8500	320	68	252	42,705	2,150	41,630
18	9000	320	68	252	45,710	3,005	44,208
19	9287						patah

Tabel 5.6. Hasil pengujian spesimen B2

Spesimen : C1

No.	Cycle	Strain Indicator		Beda Indicator	a [mm]	da [mm]	a rata [mm]
		max	min				
1	0				30,230		
2	1200	315	67	248	31,580	1,350	30,905
3	1700	315	67	248	32,290	0,710	31,935
4	2200	315	67	248	33,505	1,215	32,898
5	2700	315	67	248	34,525	1,020	34,015
6	3200	315	67	248	36,310	1,785	35,418
7	3700	315	67	248	39,785	3,475	38,048
8	4200	315	67	248	44,915	5,130	42,350
9	4470						patah

Tabel 5.7. Hasil pengujian spesimen C1

Spesimen : C2

No.	Cycle	Strain Indicator		Beda Indicator	a [mm]	da [mm]	a rata [mm]
		max	min				
1	0				29,450		
2	1000	328	71	257	30,630	1,180	30,040
3	1500	328	71	257	33,130	2,500	31,880
4	2000	328	71	257	35,630	2,500	34,380
5	2500	328	71	257	41,830	6,200	38,730
6	2763						patah

Tabel 5.8. Hasil pengujian spesimen C2



BAB VI

PERHITUNGAN DAN ANALISA

HASIL PENGUJIAN

BAB VI

PERHITUNGAN DAN ANALISA HASIL PENGUJIAN

VI.1. PERHITUNGAN DATA HASIL PENGUJIAN DINAMIS.

VI.1.1. Perhitungan Laju Perambatan Retak.

Perhitungan laju perambatan retak, (da/dN), dilakukan untuk mengetahui apakah hasil pengujian masuk dalam kriteria yang dapat dihitung dengan rumus Paris Erdogan, yaitu antara 10^{-6} m/cycle sampai 10^{-8} m/cycle. Perhitungan dilakukan dengan membagi pertambahan panjang retak dengan pertambahan cycle kemudian diubah kedalam bentuk logaritma. Perhitungan dapat dilihat pada tabel 6.1 sampai 6.6.

VI.1.2. Perhitungan Rentang Faktor Intensitas Tegangan.

Perhitungan untuk rentang Faktor Intensitas Tegangan (ΔK) memakai rumus dari ASTM E 647-93, valid untuk α (a/W) $> 0,2$. Rumus yang dipakai berdasarkan bentuk spesimen yaitu Compact Tension dengan retak awal ditepi.

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{(2 + \alpha)}{(1 - \alpha)^{3/2}} (0,866 + 4,64\alpha - 13,32\alpha^2 + 14,72\alpha^3 - 5,6\alpha^4)$$

..... (6.1)

dimana : ΔK = rentang Faktor Intensitas Tegangan,

$\Delta P = P_{\max} - P_{\min}$ = rentang pembebanan [MN] (untuk $R > 0$),

B = tebal spesimen [m], W = lebar spesimen [m], dan

$\alpha = a/W$, panjang retak dibagi lebar spesimen.

Seperti pada perhitungan laju perambatan retak, setelah didapat harga ΔK , kemudian diubah kedalam bentuk logaritma. Perhitungan untuk rentang Faktor Intensitas Tegangan dapat dilihat pada tabel 6.7 sampai 6.12.

Spesimen : A1

No.	a [mm]	da [m]	dN [cycle]	da/dN [m/cycle]	log (da/dN)
1	30,650				
2	31,690	0,001040	1300	8,0000E-07	-6,096910
3	32,020	0,000330	700	4,7143E-07	-6,326584
4	32,470	0,000450	500	9,0000E-07	-6,045757
5	32,830	0,000360	500	7,2000E-07	-6,142668
6	33,280	0,000450	500	9,0000E-07	-6,045757
7	33,720	0,000440	500	8,8000E-07	-6,055517
8	34,230	0,000510	500	1,0200E-06	-5,991400
9	34,715	0,000485	500	9,7000E-07	-6,013228
10	35,305	0,000590	500	1,1800E-06	-5,928118
11	35,840	0,000535	500	1,0700E-06	-5,970616
12	36,260	0,000420	500	8,4000E-07	-6,075721
13	36,950	0,000690	500	1,3800E-06	-5,860121
14	37,515	0,000565	500	1,1300E-06	-5,946922
15	38,255	0,000740	500	1,4800E-06	-5,829738
16	39,215	0,000960	500	1,9200E-06	-5,716699
17	39,885	0,000670	500	1,3400E-06	-5,872895
18	40,590	0,000705	500	1,4100E-06	-5,850781
19	41,600	0,001010	500	2,0200E-06	-5,694649
20	42,570	0,000970	500	1,9400E-06	-5,712198
21	43,750	0,001180	500	2,3600E-06	-5,627088
22	44,850	0,001100	500	2,2000E-06	-5,657577
23	46,480	0,001630	500	3,2600E-06	-5,486782

Tabel 6.1. Perhitungan da/dN pada spesimen A1

Spesimen : B1

No.	a [mm]	da [m]	dN [cycle]	da/dN [m/cycle]	log (da/dN)
1	30,650				
2	31,820	0,001170	1400	8,3571E-07	-6,077942
3	32,150	0,000330	600	5,5000E-07	-6,259637
4	32,555	0,000405	500	8,1000E-07	-6,091515
5	32,935	0,000380	500	7,6000E-07	-6,119186
6	33,365	0,000430	500	8,6000E-07	-6,065502
7	33,805	0,000440	500	8,8000E-07	-6,055517
8	34,335	0,000530	500	1,0600E-06	-5,974694
9	34,790	0,000455	500	9,1000E-07	-6,040959
10	35,420	0,000630	500	1,2600E-06	-5,899629
11	36,005	0,000585	500	1,1700E-06	-5,931814
12	36,735	0,000730	500	1,4600E-06	-5,835647
13	37,405	0,000670	500	1,3400E-06	-5,872895
14	37,950	0,000545	500	1,0900E-06	-5,962574
15	38,670	0,000720	500	1,4400E-06	-5,841638
16	39,495	0,000825	500	1,6500E-06	-5,782516
17	40,165	0,000670	500	1,3400E-06	-5,872895
18	41,070	0,000905	500	1,8100E-06	-5,742321
19	42,180	0,001110	500	2,2200E-06	-5,653647
20	43,220	0,001040	500	2,0800E-06	-5,681937
21	44,430	0,001210	500	2,4200E-06	-5,616185
22	46,050	0,001620	500	3,2400E-06	-5,489455
23	48,355	0,002305	500	4,6100E-06	-5,336299

Tabel 6.3. Perhitungan da/dN untuk spesimen B1.

Spesimen : A2

No.	a [mm]	da [m]	dN [cycle]	da/dN [m/cycle]	log (da/dN)
1	30,100				
2	31,365	0,001265	1100	1,1500E-06	-5,939302
3	31,705	0,000340	400	8,5000E-07	-6,070581
4	32,315	0,000610	500	1,2200E-06	-5,913640
5	32,735	0,000420	500	8,4000E-07	-6,075721
6	33,070	0,000335	500	6,7000E-07	-6,173925
7	33,640	0,000570	500	1,1400E-06	-5,943095
8	34,490	0,000850	500	1,7000E-06	-5,769551
9	35,640	0,001150	500	2,3000E-06	-5,638272
10	36,110	0,000470	500	9,4000E-07	-6,026872
11	36,840	0,000730	500	1,4600E-06	-5,835647
12	37,780	0,000940	500	1,8800E-06	-5,725842
13	39,525	0,001745	500	3,4900E-06	-5,457175
14	41,165	0,001640	500	3,2800E-06	-5,484126
15	43,215	0,002050	500	4,1000E-06	-5,387216
16	46,340	0,003125	500	6,2500E-06	-5,204120

Tabel 6.2. Perhitungan da/dN untuk spesimen A2.

Spesimen : B2

No.	a [mm]	da [m]	dN [cycle]	da/dN [m/cycle]	log (da/dN)
1	29,200				
2	30,300	0,001100	1200	9,1667E-07	-6,037789
3	30,590	0,000290	300	9,6667E-07	-6,014723
4	30,950	0,000360	500	7,2000E-07	-6,142668
5	31,295	0,000345	500	6,9000E-07	-6,161151
6	31,755	0,000460	500	9,2000E-07	-6,036212
7	32,265	0,000510	500	1,0200E-06	-5,991400
8	32,960	0,000695	500	1,3900E-06	-5,856985
9	33,595	0,000635	500	1,2700E-06	-5,896196
10	34,305	0,000710	500	1,4200E-06	-5,847712
11	35,120	0,000815	500	1,6300E-06	-5,787812
12	35,870	0,000750	500	1,5000E-06	-5,823909
13	36,915	0,001045	500	2,0900E-06	-5,679854
14	37,785	0,000870	500	1,7400E-06	-5,759451
15	38,915	0,001130	500	2,2600E-06	-5,645892
16	40,555	0,001640	500	3,2800E-06	-5,484126
17	42,705	0,002150	500	4,3000E-06	-5,366532
18	45,710	0,003005	500	6,0100E-06	-5,221126

Tabel 6.4. Hasil perhitungan da/dN untuk spesimen B2.

Spesimen : C1

No.	a [mm]	da [m]	dN [cycle]	da/dN [m/cycle]	log (da/dN)
1	30,230				
2	31,580	0,001350	1200	1,1250E-06	-5,948847
3	32,290	0,000710	500	1,4200E-06	-5,847712
4	33,505	0,001215	500	2,4300E-06	-5,614394
5	34,525	0,001020	500	2,0400E-06	-5,690370
6	36,310	0,001785	500	3,5700E-06	-5,447332
7	39,785	0,003475	500	6,9500E-06	-5,158015
8	44,915	0,005130	500	1,0260E-05	-4,988853

Tabel 6.5. Hasil perhitungan da/dN untuk spesimen C1.

Spesimen : C2

No.	a [mm]	da [m]	dN [cycle]	da/dN [m/cycle]	log (da/dN)
1	29,450				
2	30,630	0,001180	1000	1,1800E-06	-5,928118
3	33,130	0,002500	500	5,0000E-06	-5,301030
4	35,630	0,002500	500	5,0000E-06	-5,301030
5	41,830	0,006200	500	1,2400E-05	-4,906578

Tabel 6.6. Hasil perhitungan da/dN untuk spesimen C2.

Keterangan :

- A1 : spesimen dengan pengelasan dalam kondisi normal (udara).
- B1 : spesimen dengan pengelasan dalam kondisi normal (udara).
- C1 : spesimen tanpa pengelasan dalam kondisi normal (udara).
- A2 : spesimen dengan pengelasan dalam kondisi korosif (disemprot larutan amoniak)
- B2 : spesimen dengan pengelasan dalam kondisi korosif (disemprot larutan amoniak)
- C2 : spesimen tanpa pengelasan dalam kondisi korosif (disemprot larutan amoniak)

Spesimen : A1

No.	a [mm]	a rata [mm]	a rata/W	ΔP [MN]	ΔK [MPa.m ^{1/2}]	log ΔK
1	30,650					
2	31,690	31,170	0,311700	0,005425	16,418280	1,215328
3	32,020	31,855	0,318550	0,005360	16,513313	1,217834
4	32,470	32,245	0,322450	0,005425	16,881439	1,227409
5	32,830	32,650	0,326500	0,005446	17,126604	1,233671
6	33,280	33,055	0,330550	0,005382	17,101573	1,233036
7	33,720	33,500	0,335000	0,005403	17,368226	1,239755
8	34,230	33,975	0,339750	0,005403	17,582416	1,245079
9	34,715	34,473	0,344725	0,005403	17,809647	1,250655
10	35,305	35,010	0,350100	0,005403	18,058623	1,256685
11	35,840	35,573	0,355725	0,005403	18,323221	1,263002
12	36,260	36,050	0,360500	0,005403	18,551224	1,268373
13	36,950	36,605	0,366050	0,005403	18,820319	1,274627
14	37,515	37,233	0,372325	0,005403	19,130106	1,281717
15	38,255	37,885	0,378850	0,005403	19,458788	1,289116
16	39,215	38,735	0,387350	0,005403	19,897575	1,298800
17	39,885	39,550	0,395500	0,005403	20,330301	1,308144
18	40,590	40,238	0,402375	0,005403	20,705064	1,316077
19	41,600	41,095	0,410950	0,005403	21,185787	1,326045
20	42,570	42,085	0,420850	0,005403	21,760417	1,337667
21	43,750	43,160	0,431600	0,005403	22,410118	1,350444
22	44,850	44,300	0,443000	0,005403	23,130954	1,364194
23	46,480	45,665	0,456650	0,005403	24,041457	1,380961

Tabel 6.7. Perhitungan rentang Faktor Intensitas Tegangan untuk spesimen A1.

Spesimen : B1

No.	a [mm]	a rata [mm]	a rata/W	ΔP [MN]	ΔK [MPa.m ^{1/2}]	log ΔK
1	30,650					
2	31,820	31,235	0,312350	0,005360	16,250357	1,210863
3	32,150	31,985	0,319850	0,005403	16,701885	1,222765
4	32,555	32,353	0,323525	0,005403	16,861279	1,226891
5	32,935	32,745	0,327450	0,005403	17,033068	1,231293
6	33,365	33,150	0,331500	0,005360	17,075042	1,232362
7	33,805	33,585	0,335850	0,005446	17,544931	1,244152
8	34,335	34,070	0,340700	0,005403	17,625574	1,246143
9	34,790	34,563	0,345625	0,005425	17,922136	1,253390
10	35,420	35,105	0,351050	0,005382	18,030957	1,256019
11	36,005	35,713	0,357125	0,005425	18,462940	1,266301
12	36,735	36,370	0,363700	0,005446	18,854745	1,275421
13	37,405	37,070	0,370700	0,005360	18,897653	1,276408
14	37,950	37,678	0,376775	0,005446	19,507590	1,290204
15	38,670	38,310	0,383100	0,005382	19,598314	1,292219
16	39,495	39,083	0,390825	0,005403	20,080597	1,302777
17	40,165	39,830	0,398300	0,005339	20,237245	1,306151
18	41,070	40,618	0,406175	0,005425	20,999479	1,322209
19	42,180	41,625	0,416250	0,005489	21,832875	1,339111
20	43,220	42,700	0,427000	0,005425	22,216769	1,346681
21	44,430	43,825	0,438250	0,005360	22,644718	1,354967
22	46,050	45,240	0,452400	0,005446	23,941210	1,379146
23	48,355	47,203	0,472025	0,005446	25,335950	1,403737

Tabel 6.8. Perhitungan rentang Faktor Intensitas Tegangan untuk spesimen B1.



Spesimen : A2

No.	a [mm]	a rata [mm]	a rata/W	ΔP [MN]	ΔK [MPa.m ^{1/2}]	log ΔK
1	30,100					
2	31,365	30,733	0,307325	0,005511	16,490388	1,217231
3	31,705	31,535	0,315350	0,005511	16,837113	1,226268
4	32,315	32,010	0,320100	0,005511	17,045304	1,231605
5	32,735	32,525	0,325250	0,005511	17,273654	1,237384
6	33,070	32,903	0,329025	0,005511	17,442842	1,241617
7	33,640	33,355	0,333550	0,005511	17,647738	1,246689
8	34,490	34,065	0,340650	0,005511	17,974043	1,254646
9	35,640	35,065	0,350650	0,005511	18,444228	1,265860
10	36,110	35,875	0,358750	0,005511	18,834833	1,274962
11	36,840	36,475	0,364750	0,005511	19,130188	1,281719
12	37,780	37,310	0,373100	0,005511	19,550290	1,291153
13	39,525	38,653	0,386525	0,005511	20,249588	1,306416
14	41,165	40,345	0,403450	0,005511	21,177764	1,325880
15	43,215	42,190	0,421900	0,005511	22,256982	1,347466
16	46,340	44,778	0,447775	0,005511	23,909912	1,378578

Tabel 6.9. Perhitungan rentang Faktor Intensitas Tegangan untuk spesimen A2.

Spesimen : B2

No.	a [mm]	a rata [mm]	a rata/W	ΔP [MN]	ΔK [MPa.m ^{1/2}]	log ΔK
1	29,200					
2	30,300	29,750	0,297500	0,005403	15,760233	1,197563
3	30,590	30,445	0,304450	0,005403	16,048236	1,205427
4	30,950	30,770	0,307700	0,005403	16,184350	1,209095
5	31,295	31,123	0,311225	0,005403	16,333060	1,213068
6	31,755	31,525	0,315250	0,005403	16,504282	1,217597
7	32,265	32,010	0,320100	0,005403	16,712684	1,223046
8	32,960	32,613	0,326125	0,005403	16,974893	1,229807
9	33,595	33,278	0,332775	0,005403	17,268792	1,237262
10	34,305	33,950	0,339500	0,005403	17,571076	1,244798
11	35,120	34,713	0,347125	0,005403	17,920363	1,253347
12	35,870	35,495	0,354950	0,005403	18,286512	1,262131
13	36,915	36,393	0,363925	0,005403	18,716756	1,272231
14	37,785	37,350	0,373500	0,005403	19,188791	1,283048
15	38,915	38,350	0,383500	0,005403	19,697297	1,294407
16	40,555	39,735	0,397350	0,005403	20,430247	1,310274
17	42,705	41,630	0,416300	0,005403	21,493610	1,332309
18	45,710	44,208	0,442075	0,005403	23,071173	1,363070

Tabel 6.10. Perhitungan rentang Faktor Intensitas Tegangan untuk spesimen B2.

Spesimen : C1

No.	a [mm]	a rata [mm]	a rata/W	ΔP [MN]	ΔK [MPa.m ^{1/2}]	log ΔK
1	30,230					
2	31,580	30,905	0,309050	0,005317	15,982580	1,203647
3	32,290	31,935	0,319350	0,005317	16,414724	1,215234
4	33,505	32,898	0,328975	0,005317	16,827991	1,226032
5	34,525	34,015	0,340150	0,005317	17,320342	1,238556
6	36,310	35,418	0,354175	0,005317	17,959315	1,254290
7	39,785	38,048	0,380475	0,005317	19,230585	1,283993
8	44,915	42,350	0,423500	0,005317	21,569031	1,333831

Tabel 6.11. Perhitungan rentang Faktor Intensitas Tegangan untuk spesimen C1.

Spesimen : C2

No.	a [mm]	a rata [mm]	a rata/W	ΔP [MN]	ΔK [MPa.m ^{1/2}]	log ΔK
1	29,450					
2	30,630	30,040	0,300400	0,005511	16,195955	1,209407
3	33,130	31,880	0,318800	0,005511	16,988099	1,230145
4	35,630	34,380	0,343800	0,005511	18,120775	1,258177
5	41,830	38,730	0,387300	0,005511	20,290912	1,307302

Tabel 6.12. Perhitungan rentang Faktor Intensitas Tegangan untuk spesimen C2.

Keterangan :

- A1 : spesimen dengan pengelasan dalam kondisi normal (udara).
- B1 : spesimen dengan pengelasan dalam kondisi normal (udara).
- C1 : spesimen tanpa pengelasan dalam kondisi normal (udara).
- A2 : spesimen dengan pengelasan dalam kondisi korosif (disemprot larutan amoniak)
- B2 : spesimen dengan pengelasan dalam kondisi korosif (disemprot larutan amoniak)
- C2 : spesimen tanpa pengelasan dalam kondisi korosif (disemprot larutan amoniak)

VI.1.3. Grafik Laju Perambatan Retak.

Dari hasil perhitungan harga laju perambatan retak (da/dN) dan rentang Faktor Intensitas Tegangan (ΔK), hubungan kedua variabel tersebut dapat dinyatakan dengan persamaan Paris-Erdogan dalam bentuk logaritma [Broek, 1982].

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad \dots (6.2)$$

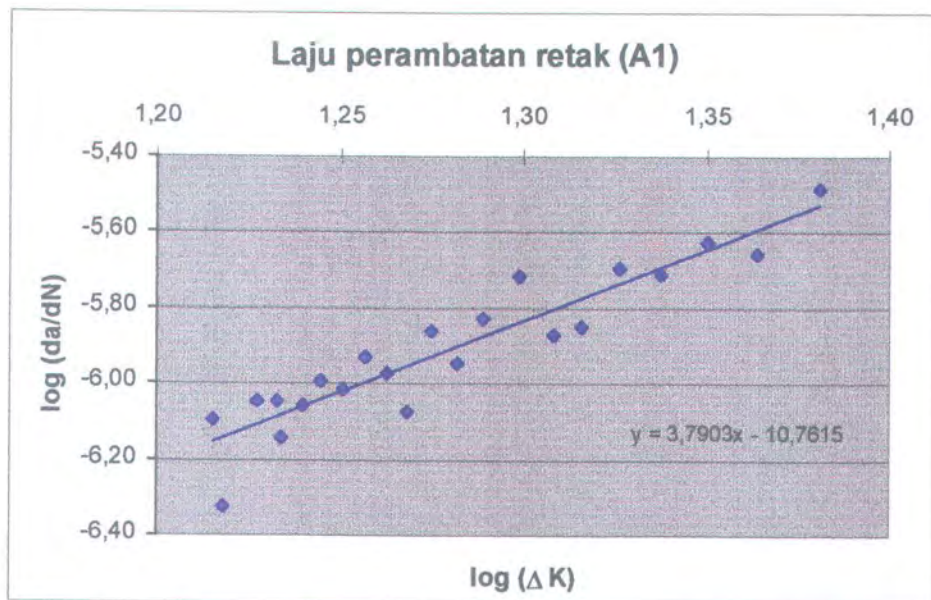
diubah menjadi :

$$\log\left(\frac{da}{dN}\right) = \log C + m \log(\Delta K) \quad \dots (6.3)$$

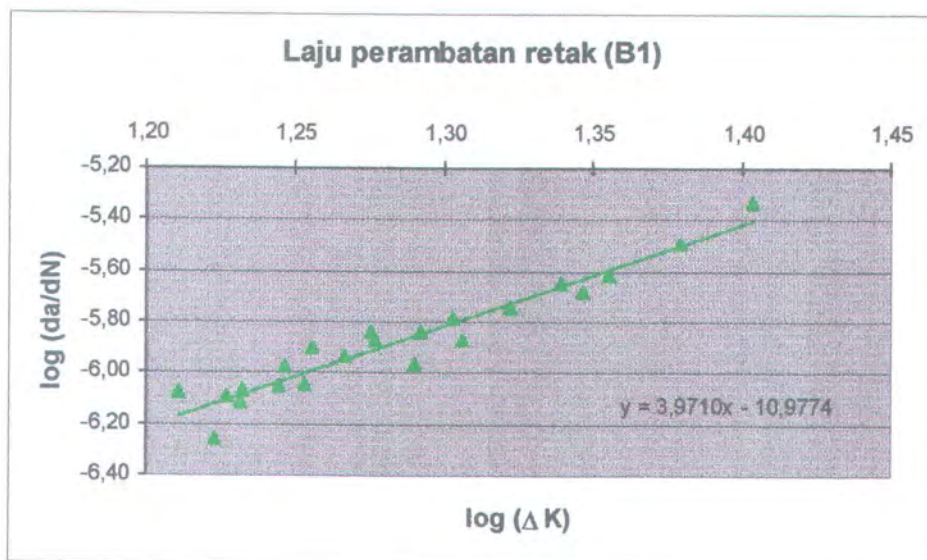
Bentuk penurunan persamaan Paris Erdogan diatas menunjukkan bentuk persamaan garis linier, sehingga hasil perhitungan digunakan metode regresi linier untuk mencari konstanta m dan C . Dari rumus diatas, akan dibuat grafik mengenai laju perambatan retak, dimana $\log(da/dN)$ sebagai ordinat dan $\log(\Delta K)$ sebagai absis. Dengan demikian dapat kita ketahui besar konstanta C (dalam logaritma) dan m , dimana m nanti sebagai gradien dari grafik tersebut.

Keterangan :

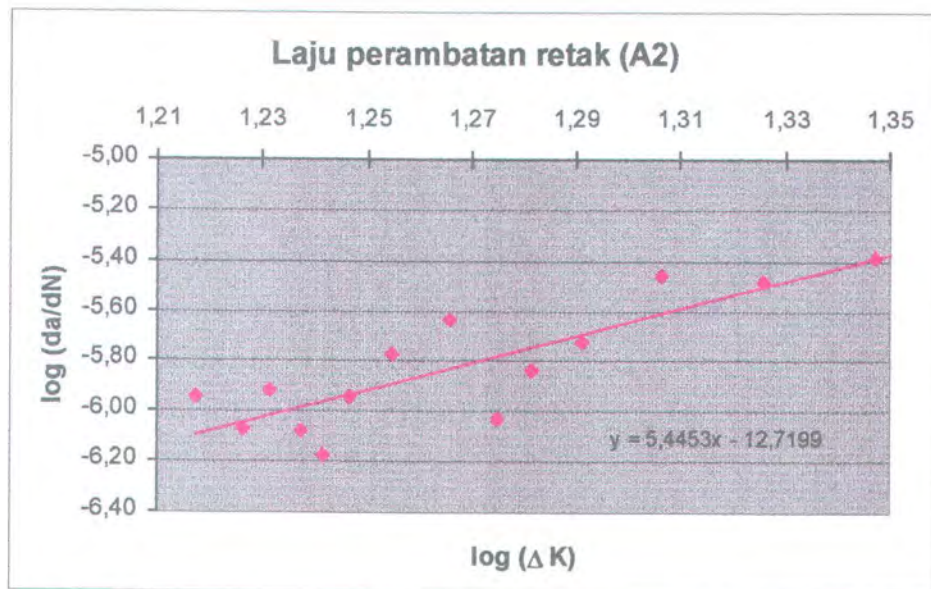
- A1 : spesimen dengan pengelasan dalam kondisi normal (udara).
- B1 : spesimen dengan pengelasan dalam kondisi normal (udara).
- C1 : spesimen tanpa pengelasan dalam kondisi normal (udara).
- A2 : spesimen dengan pengelasan dalam kondisi korosif (disemprot larutan amoniak)
- B2 : spesimen dengan pengelasan dalam kondisi korosif (disemprot larutan amoniak)
- C2 : spesimen tanpa pengelasan dalam kondisi korosif (disemprot larutan amoniak)



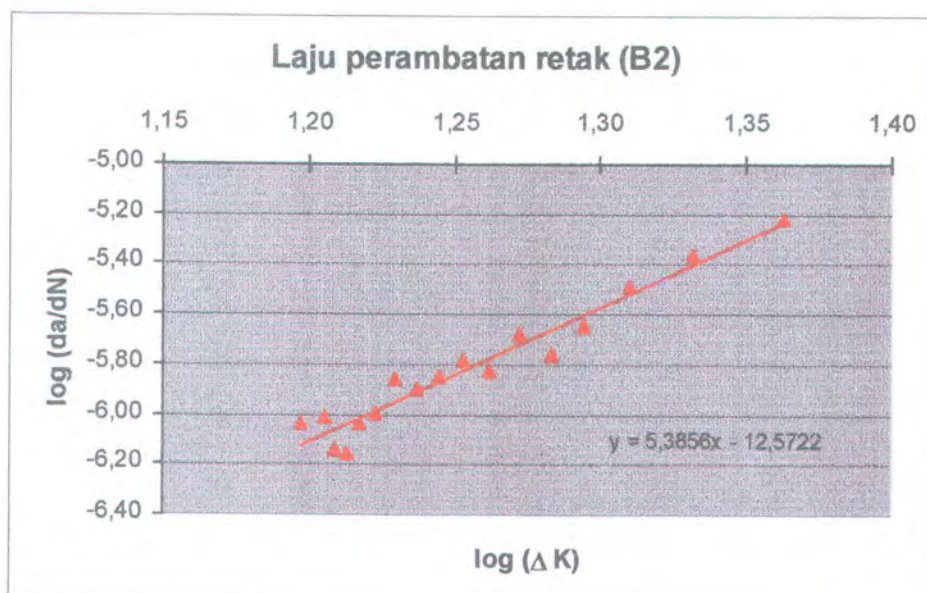
Gambar 6.1. Grafik laju perambatan retak untuk spesimen A1 (dilas dan lingkungan normal).



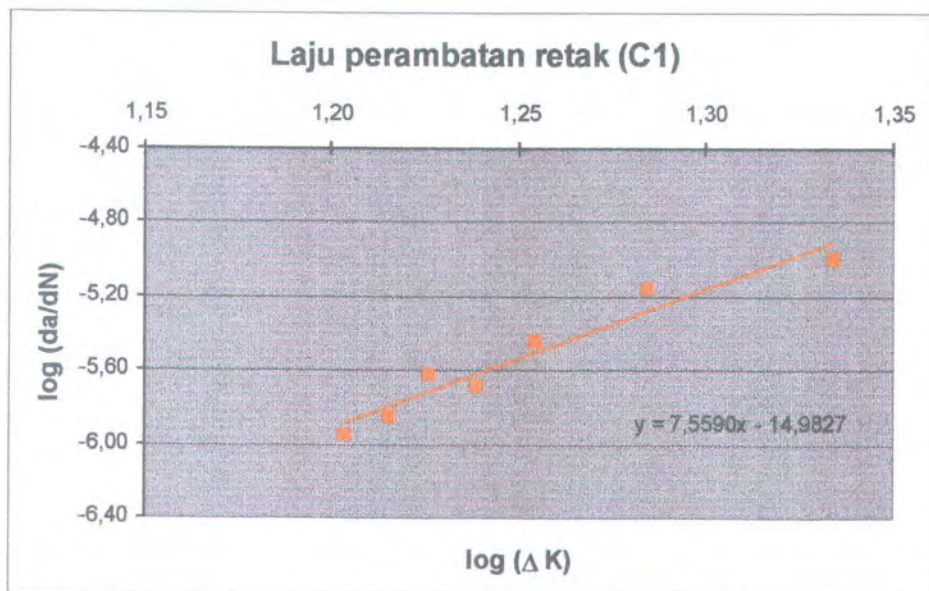
Gambar 6.2. Grafik laju perambatan retak untuk spesimen B1 (dilas dan lingkungan normal).



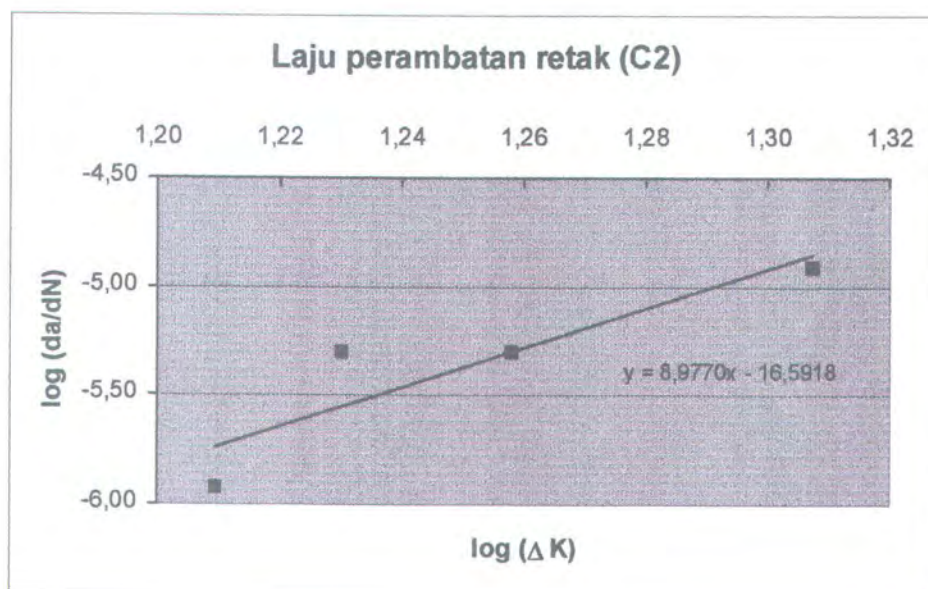
Gambar 6.3. Grafik laju perambatan retak untuk spesimen A2 (dilas dan lingkungan korosif).



Gambar 6.4. Grafik laju perambatan retak untuk spesimen B2 (dilas dan lingkungan korosif).



Gambar 6.5. Grafik laju perambatan retak untuk spesimen C1 (tanpa las dan lingkungan normal).



Gambar 6.6. Grafik laju perambatan retak untuk spesimen C2 (tanpa las dan lingkungan korosif).

VI.2. ANALISA HASIL PENGUJIAN.

Dari hasil perhitungan data hasil pengujian, akan dilakukan analisa untuk mendapatkan kesimpulan dari pengujian, dengan berdasarkan teori yang telah ada dan perbandingan dengan hasil penelitian lain. Sehingga dengan analisa ini akan diketahui perbandingan leleh korosi pada material yang diuji.

Analisa dilakukan terhadap :

1. hasil perambatan retak
2. grafik perambatan retak
3. konstanta m.
4. beban dan proses kimia yang terjadi.

VI.2.1. Analisa Hasil Perambatan Retak.

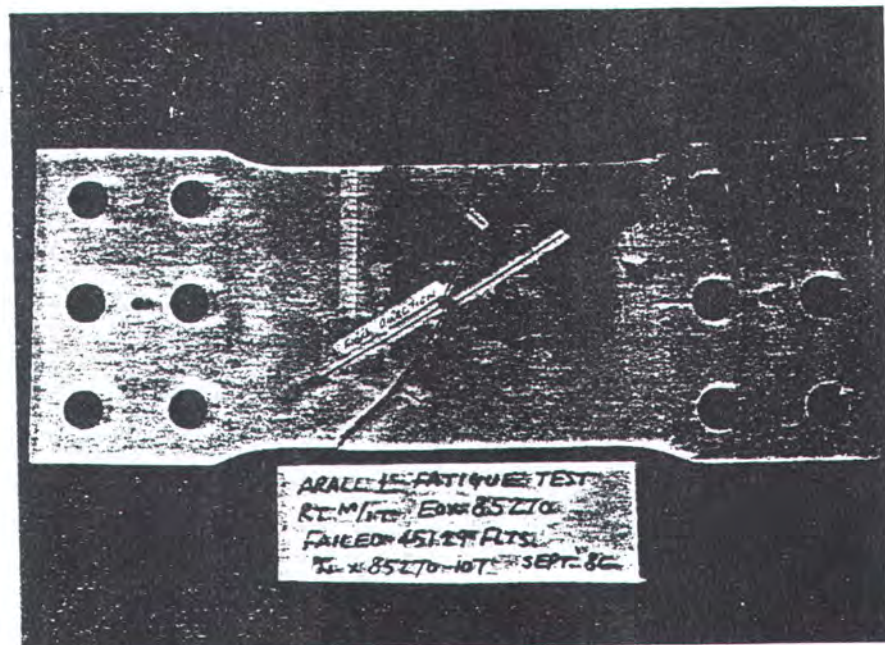
Dari hasil pengujian yang telah dilakukan, dapat diketahui rentang laju perambatan retak maksimum dan minimum dari tiap spesimen uji. Hasil rentang laju perambatan retak untuk semua spesimen uji sebagai berikut :

Spesimen	da [m/cycle]	
	max	min
A1	4,3000E-06	4,7143E-07
A2	6,2500E-06	6,7000E-07
B1	4,6100E-06	5,5000E-07
B2	6,0100E-06	6,9000E-07
C1	1,0260E-05	1,1250E-06
C2	1,2400E-05	1,1800E-06

Tabel 6.13. Rentang laju perambatan retak pada spesimen uji.

Dari hasil pengamatan secara visual (lampiran C), dapat dilihat bahwa untuk spesimen A1, A2, B1 dan B2 hasil perambatan retak tegak lurus dengan arah pembebanan. Hal ini sesuai dengan teori, dimana biasanya retak menjalar ke arah tegak lurus dengan arah pembebanan. Sedang untuk spesimen C1 dan C2 arah

perambatan retak tidak tegak lurus dengan arah pembebanan (membentuk sudut). Hal ini disebabkan karena spesimen A1, A2, B1 dan B2 mempunyai arah serat (*fibre orientation*) yang searah dengan arah pembebanan dan untuk spesimen C1 dan C2 arah serat tegak lurus dengan pembebanan. Secara teori, arah serat yang searah dengan arah pembebanan akan menghasilkan laju perambatan retak yang lebih lambat dibanding dengan arah serat yang tegak lurus dengan arah pembebanan.

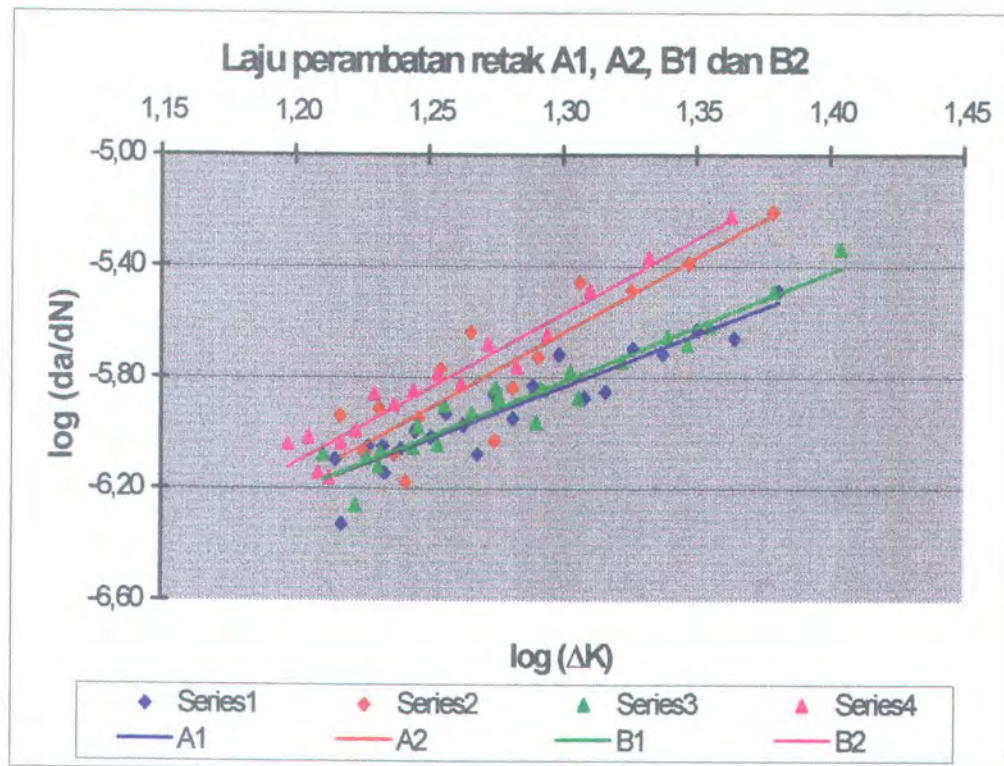


Gambar 6.7. Spesimen uji ARALL-1 (30°) sesudah mengalami kepecahan. [Ioannou, 1987]

VI.2.2. Analisa Grafik Perambatan Retak.

Grafik laju perambatan retak adalah grafik yang menunjukkan hubungan antara kecepatan pertumbuhan retak dengan rentang Faktor Intensitas Tegangan sehingga dari grafik tersebut dapat diperoleh harga da/dN untuk masing-masing spesimen uji.

Dari gambar 6.8, dapat dikatakan bahwa laju perambatan retak untuk spesimen uji pada kondisi korosif (larutan amoniak), yaitu spesimen A2 dan B2, lebih cepat dibandingkan dengan pada kondisi normal (udara), spesimen A1 dan B1. Sehingga dapat dikatakan bahwa jika retak yang terjadi pada suatu permukaan material dan berada dalam kondisi lingkungan korosif akan menyebabkan laju perambatan retak berjalan cukup cepat.



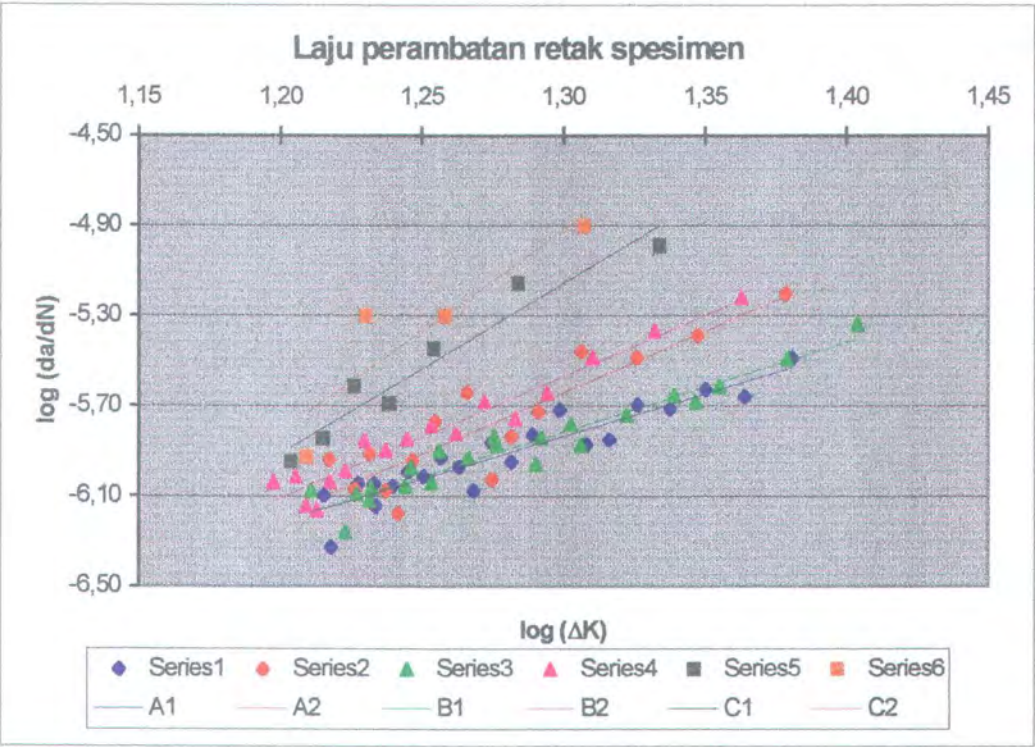
Gambar 6.8. Perbandingan laju perambatan retak A1, A2, B1, dan B2.

A1 dan B1 spesimen yang dilas dalam lingkungan normal.

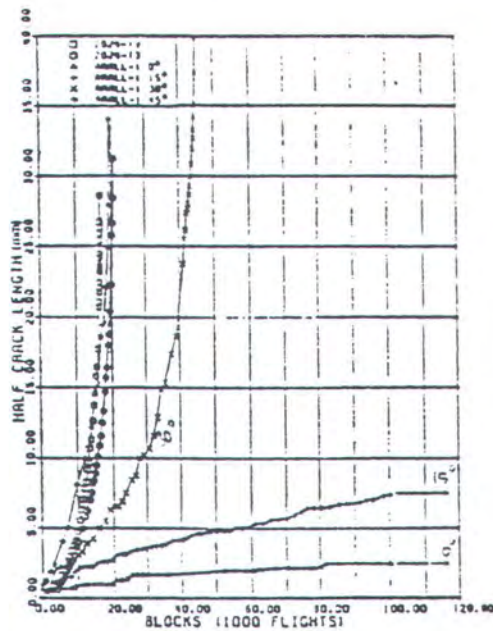
A2 dan B2, spesimen yang dilas dalam larutan amoniak.

Untuk material dengan arah serat (*fibre orientation*) yang berbeda, dalam hal ini adalah spesimen C1 (normal) dan C2 (lingkungan korosif), laju perambatan retak juga berbeda. Untuk material dengan *fibre orientation* yang searah dengan arah pembebanan akan memiliki laju perambatan retak yang lebih lambat dari material dengan *fibre orientation* yang tidak searah (membentuk

sudut) dengan arah pembebanan. Semakin besar sudut antara *fibre orientation* dengan arah pembebanan semakin besar pula laju perambatan retak. Hal ini dapat dilihat dari pertambahan panjang retak dengan cycle yang kecil.



Gambar 6.9. Perbandingan laju perambatan retak untuk semua spesimen uji.



Gambar 6.10. Kurva pertumbuhan retak untuk spesimen ARALL-1 dan 2024. [Ioannou, 1987]

VI.2.3. Analisa Konstanta C dan m.

Dari hasil pengujian, dibuat grafik yang menyatakan laju perambatan retak dibanding dengan rentang Faktor Intensitas Tegangan. Karena grafik tersebut merupakan hubungan linier, maka dapat dicari persamaan dari tiap-tiap grafik. Dari hasil persamaan garis linier tiap grafik, akan didapat gradien, dimana gradien ini merupakan konstanta eksponen m dari persamaan Paris Erdogan.

$$\frac{da}{dN} = C.(\Delta K)^m \quad \dots (6.4)$$

diubah menjadi bentuk logaritma :

$$\log\left(\frac{da}{dN}\right) = m.\log(\Delta K) + \log(C) \quad \dots (6.5)$$

Dibanding dengan konstanta C, konstanta eksponen m sangat berpengaruh terhadap laju perambatan retak. Hal ini disebabkan karena konstanta m merupakan bilangan pangkat, dimana menunjukkan bahwa semakin besar pangkat dari suatu bilangan tertentu maka hasil dari pemangkatan itu semakin tinggi.

Spesimen	m	C
A1	3,790277	1,73190E-11
A2	5,445257	1,90572E-13
B1	3,971025	1,05352E-11
B2	5,385571	2,67798E-13
C1	7,558971	1,04070E-15
C2	8,977039	2,55991E-17

Tabel 6.14. Hasil perhitungan konstanta C dan m.

Ini menunjukkan bahwa harga m yang besar (A2, B2, C1 dan C2) akan menghasilkan laju perambatan retak semakin besar untuk ΔK yang sama. Seperti yang telah disebut diatas, harga m merupakan gradien dari persamaan garis linier dari grafik laju perambatan retak. Dengan demikian semakin besar gradien dari

suatu garis maka dapat dikatakan bahwa material tersebut mempunyai laju perambatan retak yang cepat.

Harga m yang besar (lebih dari 5) dapat dikatakan retak kelelahan yang terjadi berdasarkan ada kerusakan kumulatif pada daerah plastis didepan ujung retak yaitu apabila kepecahan yang dihasilkan oleh suatu proses secara mikro, dimana daerah plastis balik kira-kira berukuran sama dengan proses kepecahan yang terjadi.

VI.2.4. Analisa Beban dan Proses Kimia yang Terjadi.

1. Analisa beban yang terjadi.

- Dengan adanya beban lelah yang dikenakan pada spesimen, maka tegangan tarik akan membuka ujung retak dan memberi kesempatan larutan amoniak untuk masuk.
- Penghilangan selaput tipis pelindung aluminium pada ujung retak terjadi akibat slip geser (undakan sesar). Undakan sesar terjadi pada material akibat adanya beban berulang dan dengan terkikisnya lapisan pelindung ini akan membuat bagian tersebut lebih anodik dibanding daerah sekitarnya.
- Tegangan dalam memberikan kekenyalan pada daerah ujung retak, yang akan memperbesar sifat anodik pada daerah ujung retak.

2. Analisa proses kimia yang terjadi pada ujung retak.

Dari analisa kecepatan perambatan retak, pada rentang intensitas tertentu, spesimen yang disemprot dengan larutan amoniak mempunyai pertambahan yang tinggi, hal ini dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Hidrogen Embrittlement.

Dari proses korosi permukaan terjadi penguraian hidrogen menjadi ion-ion hidrogen (H^+), yang kemudian akan berdifusi ke dalam aluminium pada daerah takikan, terutama pada daerah selaput aluminium yang terkikis.

Didaerah ujung retak pada siklus-siklus tertentu akan terbuka yang dapat dimasuki oleh media korosif. Karena pengaruh kondisi korosif, ujung retak akan menjadi lebih anodik dibanding daerah sekitarnya.

Kondisi korosif ini dapat juga terjadi akibat adanya slip step yang akan menyingkap lapisan tipis oksida sebagai pelindung terhadap serangan korosi. Dalam kondisi tersebut, maka pada daerah ujung retak akan lebih cepat terkorosi sehingga mempunyai dampak terhadap laju perambatan retak yang semakin cepat.

2. Formasi lubang kecil pada retak fatik.

Proses formasi lubang kecil ini terbagi menjadi beberapa tahapan yaitu :

▪ Tahap I

Terjadi reaksi elektrokimia awal selama fatik dalam larutan amoniak.

▪ Tahap II

Perpindahan ion-ion korosif dari larutan amoniak yang masuk ke dalam retak.

▪ Tahap III

Terjadinya hidrogen embrittlement yang disebabkan formasi hidrogen dari ion H^+ yang dibentuk pada tahap II.

- Tahap IV

Pelebaran retak pada tahap I, II, dan III akibat disolusi.



BAB VII

KESIMPULAN DAN SARAN

BAB VII

KESIMPULAN DAN SARAN

VII.1. KESIMPULAN.

Dari hasil dan analisa pengujian yang dilakukan, maka dapat disimpulkan :

1. Laju perambatan retak pada lingkungan korosif, dalam hal ini larutan amoniak, lebih besar daripada laju perambatan pada lingkungan normal (udara) pada aluminium tipe 5083.
2. Dari konstanta m yang didapat, diketahui bahwa perambatan retak yang terjadi berdasarkan pada kerusakan kumulatif pada daerah plastis didepan ujung retak dan retak ini disebabkan oleh proses mikro.
3. Adanya ion-ion agresor yang terkandung dalam larutan amoniak, akan menyebabkan reaksi kimia yang bersifat korosif terhadap unsur logam, dalam hal ini aluminium tipe 5083, sehingga mengakibatkan pengujian kelelahan pada aluminium tipe 5083 terhadap pengaruh larutan amoniak yang telah dilakukan memiliki laju pertambahan retak yang lebih tinggi dari pengujian kelelahan pada kondisi normal.

VII.2. SARAN.

Dari hasil pengujian pengaruh lingkungan korosif terhadap laju perambatan retak pada aluminium tipe 5083 yang telah dilakukan, ada beberapa saran untuk pengujian selanjutnya :

1. Dalam pengujian dinamis perlu diperhatikan lebih teliti mengenai persiapan terhadap spesimen maupun mesin uji dinamis.
2. Pengujian terhadap arah serat yang searah dengan pembebanan perlu diuji dan dibandingkan dengan hasil pengujian yang telah dilakukan.
3. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut terhadap kondisi lingkungan dan media korosif yang berbeda.

DAFTAR PUSTAKA

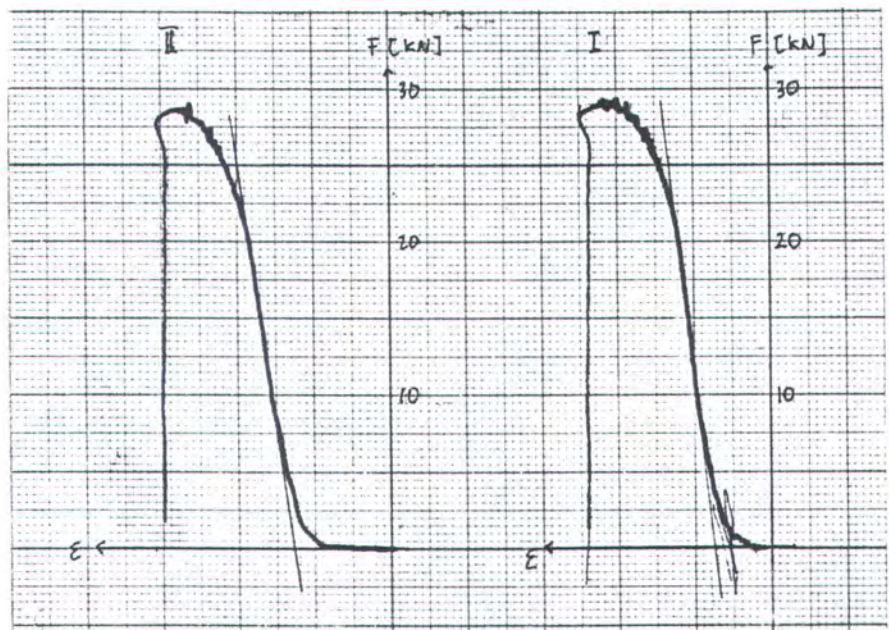
- Annual Book of ASTM Standards**, vol. 02.02., 1994, "Aluminium and Magnesium Alloy", Philadelphia.
- Annual Book of ASTM Standards**, vol. 03.01., 1994, "Metals-Mechanical Testing; Elevated and Low Temperature Test, Metallography", Philadelphia.
- Brick, R.M., Pense, A.W., Gordon, R.B.**, 1977, "Structure and Properties of Engineering Materials", 4th ed., McGraw-Hill Kogakusha, Tokyo.
- Brodjonegoro, S.S.**, 1987, "Kursus Singkat Beberapa Aspek Dinamika Struktur; Mekanika Patahan dan Perambatan Retak untuk Kasus Elastis Linier", ITB, Bandung.
- Broek, D.**, 1984, "Elementary Engineering Fracture Mechanics", 3rd ed., Martinus Nijhoff Publishing Co, Netherland.
- Effendi, A.**, 1997, "Analisa SCC Dari Stainless Steel Type 304 Pada Media Natrium Sulfat", Tugas Akhir Teknik Perkapalan FTK-ITS.
- Fontana, M.G.**, 1987, "Corrosion Engineering", 3rd ed., McGraw-Hill Book Co., Singapore.
- Ioannou, M., Kok, L.J., Fielding, T.M., McNeil, N.J.**, 1987, "New Materials and Fatigue Resistant Aircraft Design; Evaluation of New Materials in The Design of Aircraft Structures", EMAS, UK.
- Jones, R.H.**, 1996, "Stress Corrosion Cracking", 3rd ed., The Materials Information Society.

- Knott, J.F.**, 1976, "Fundamentals of Fracture Mechanics", 2nd ed., Butterworth, London.
- Rolfe, S.T., Barsom, J.M.**, 1977, "Fracture and Fatigue Control in Structures; Applications of Fracture Mechanics", Prentice Hall, N.J.
- Schijve, J.**, 1982, "Lectures Notes on Fatigue, Static Tensile Strength and Stress Corrosion of Aircraft Materials and Structures", Delft University of Technology - Report LR 360.
- Trethewey, K.R., Chamberlain, J.**, 1991, "Korosi, Untuk Mahasiswa dan Rekayasawan", Gramedia, Jakarta.
- Wirjosumarto, H., Okumura, T.**, 1994, "Teknologi Pengelasan Logam", Pradnya Paramita, Jakarta.

~ LAMPIRAN ~

Lampiran A

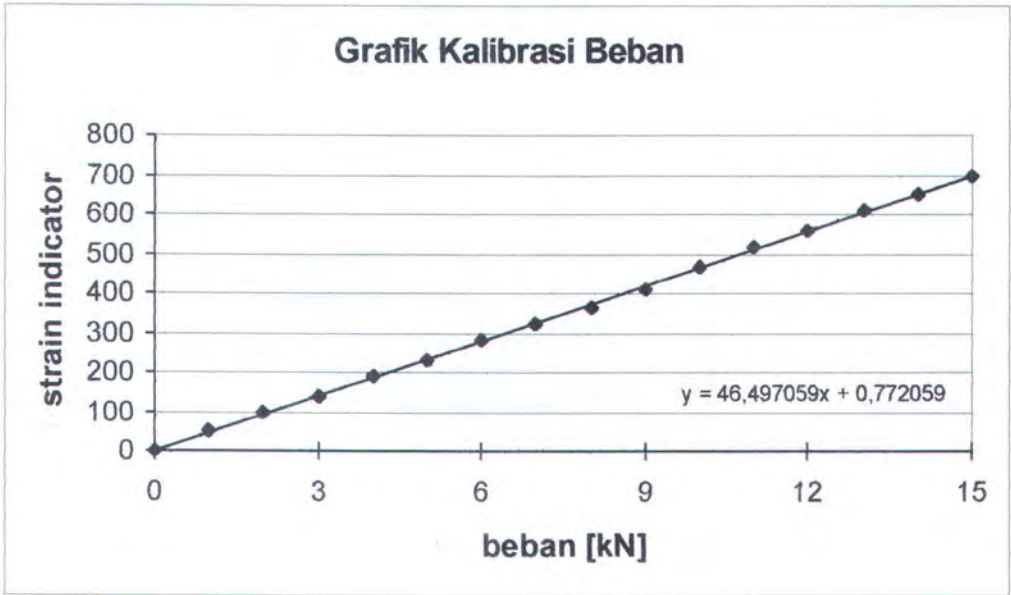
Grafik hasil uji tarik spesimen I dan II



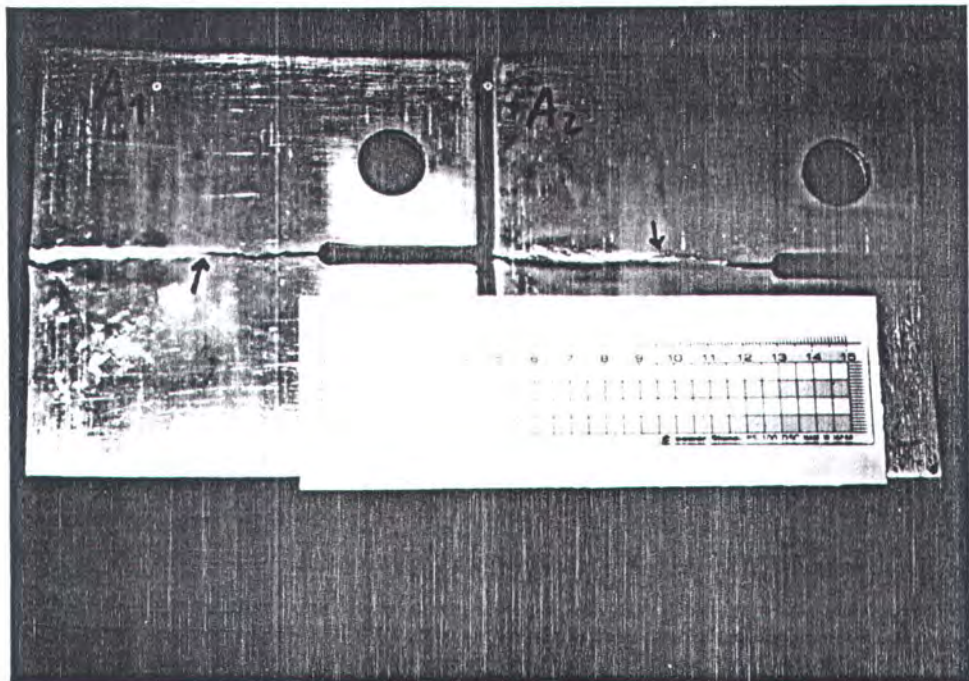
LAMPIRAN B

Hasil kalibrasi mesin uji dinamis

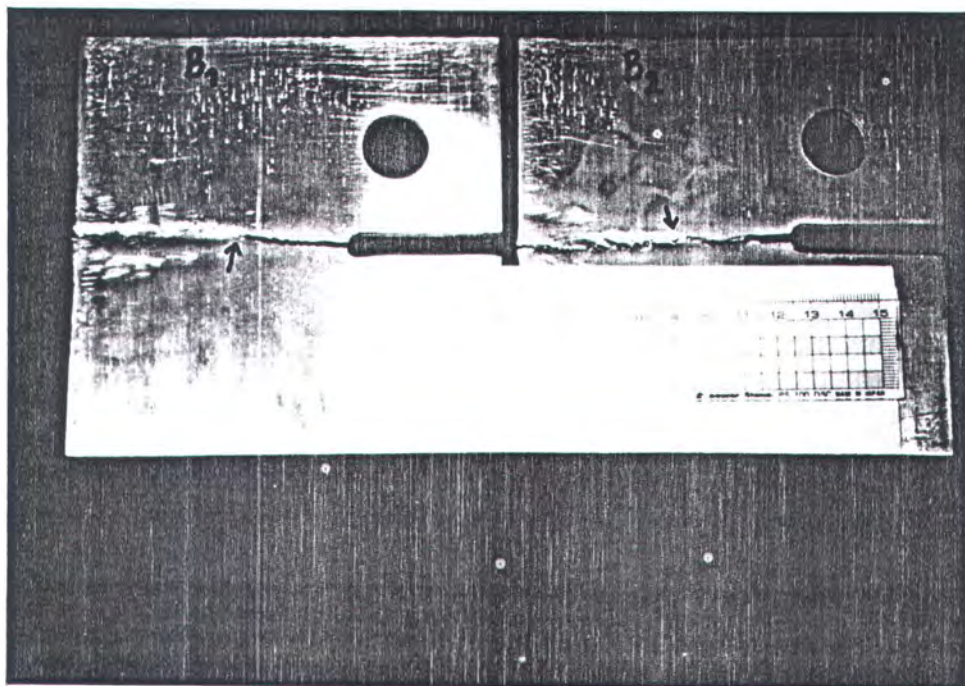
No	kN	SI
1	0	0
2	1	50
3	2	97
4	3	140
5	4	190
6	5	231
7	6	282
8	7	322
9	8	366
10	9	412
11	10	465
12	11	517
13	12	560
14	13	608
15	14	653
16	15	699



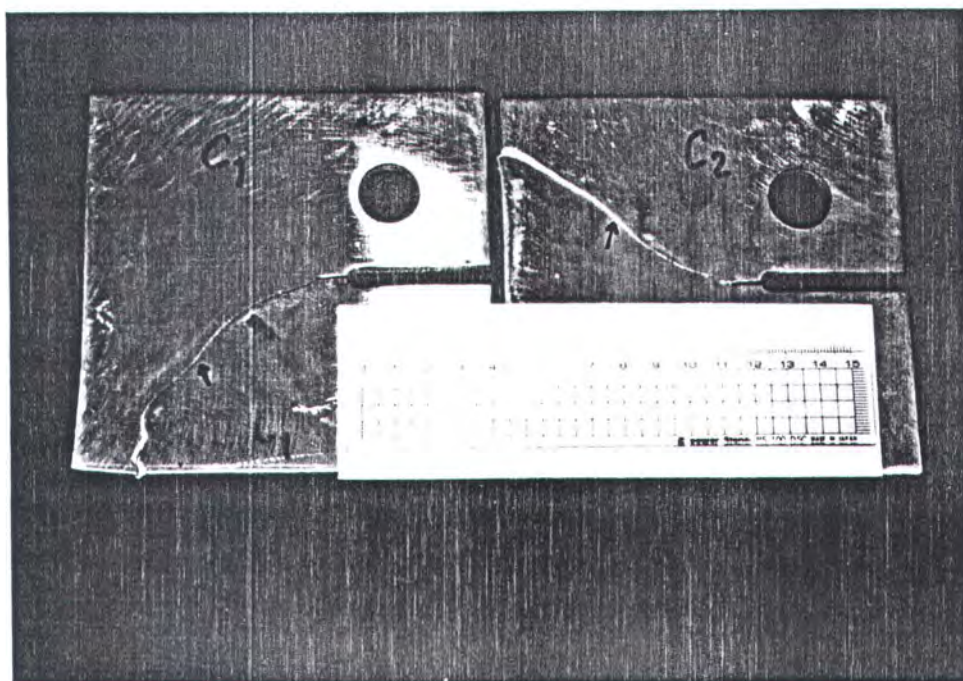
LAMPIRAN C



Gambar C.1. Hasil pengujian dinamis untuk spesimen A1 dan A2.



Gambar C.2. Hasil pengujian dinamis untuk spesimen B1 dan B2.



Gambar C.1. Hasil pengujian dinamis untuk spesimen C1 dan C2.

Table 1.2
Compositions and Applications of Nonheat-Treatable Wrought Alloys

Aluminum Association Designation	Nominal Composition (% Alloying Element)				Typical Applications
	Cu	Mn	Mg	Cr	
1060	99.60% minimum aluminum				Chemical process equipment, tanks, piping.
1100	99.00% minimum aluminum				Architectural and decorative applications, furniture, deep drawn parts, spun hollow ware.
1350	99.50% minimum aluminum				Electrical conductor wire, bus and cable.
3003	0.12	1.2	—	—	General purpose applications where slightly higher strength than 1100 is required. Process and food handling equipment, chemical and petroleum drums and tanks.
3004	—	1.2	1.0	—	Sheet metal requiring higher strength than 3003.
5005	—	—	0.8	—	Electrical conductor and architectural applications.
5050	—	—	1.4	—	Similar to 3003 and 5005 but stronger. Has excellent finishing qualities.
5052, 5652	—	—	2.5	—	Sheet metal applications requiring higher strength than 5050. Formable and good corrosion resistance. Storage tanks, boats, appliances. Alloy 5652 has closer control of impurities for H ₂ O ₂ service.
5083	—	0.7	4.4	0.15	Marine components, tanks, unfired pressure vessels, cryogenics structures, railroad cars, drilling rigs.
5086	—	0.45	4.0	0.15	Marine components, tanks, tankers, truck frames.
5154, 5254	—	—	3.5	0.25	Unfired pressure vessels, tankers. Alloy 5254 has closer control of impurities for H ₂ O ₂ service.
5454	—	0.8	2.7	0.12	Structural applications and tanks for sustained high-temperature service.
5456	—	0.8	5.1	0.12	Structures, tanks, unfired pressure vessels, marine components.

To remove the effects of strain hardening and improve ductility, the nonheat-treatable alloys may be annealed by heating to a uniform temperature in the range of 650 to 775 °F (343 to 410 °C). The exact annealing schedule will depend upon the alloy and its temper. Although the rate of cooling from the annealing temperature is unimportant, fixturing may be required to prevent distortion or warping. Basic temper designations applicable to the nonheat-treatable alloys are indicated in Table 1.3.

When fusion welded, the nonheat-treatable alloys lose the effects of strain hardening in a narrow heat-affected zone (HAZ) adjacent to the weld; the strength in the HAZ will approach that of the annealed condition. Table 1.4 contains information on the relative weldability and properties of common nonheat-treatable alloys in various tempers.

Heat-Treatable Aluminum Alloys

THE INITIAL STRENGTH of aluminum alloys in this group depends upon the alloy composition, just as the nonheat-treatable alloys. Since elements such as copper, magnesium, zinc, and silicon, either singularly or in various combinations, show a marked increase in solid solubility in aluminum with increasing temperature, it is possible to subject them to thermal treatment that will impart pronounced strengthening. Heat-treatable aluminum alloys develop their properties by solution heat treating and quenching, followed by either natural or artificial aging. Cold working may add additional strength. The heat-treatable alloys may also be annealed to attain maximum ductility. This treatment involves holding at an elevated temperature and controlled cooling to achieve maximum softening. Ba

Table 1.4B
Weldability and Properties of Nonheat-Treatable Wrought Aluminum Alloys
PHYSICAL PROPERTIES

Aluminum Alloy	Temper	Density		Approximate Melting Range		Thermal Conductivity ^a		Electrical Conductivity (% IACS) ^b
		lb/in. ³	kg/m ³	°F	°C	BTU/(h·ft·°F)	W/(m·K)	
1060	-O	0.0975	2699	1195-1215	646-657	135	234	62
	-H18					133	231	61
1100	-O	0.098	2713	1190-1215	643-657	128	222	59
	-H18					126	218	57
1350	-O	0.0975	2699	1195-1215	646-657	135	234	62
	-H19					135	234	62
3003	-O	0.099	2740	1190-1210	643-654	112	193	50
	-H14					92	158	41
	-H18					89	154	40
3004	-O	0.098	2713	1165-1210	629-654	94	163	42
	-H34					94	163	42
	-H38					94	163	42
5005	-O	0.098	1713	1170-1210	632-654	116	200	52
	-H34					116	200	52
	-H38					116	200	52
5050	-O	0.097	2685	1155-1205	624-652	112	193	50
	-H34					112	193	50
	-H38					112	193	50
5052, 5652	-O	0.097	2685	1125-1200	607-649	80	138	35
	-H34					80	138	35
	-H38					80	138	35
5083	-O	0.096	2657	1065-1180	574-638	68	117	29
5086	-O	0.096	2657	1085-1185	585-641	72	125	31
5154, 5254	-O	0.096	2657	1100-1190	593-643	72	125	32
	-H12					72	125	32
	-H34					72	125	32
	-H38					72	125	32
5454	-O	0.097	2685	1115-1195	602-646	77	134	34
	-H32					77	134	34
	-H34					77	134	34
5456	-O	0.096	2657	1055-1180	568-638	68	117	29

a. Thermal conductivity at 77°F (25°C).

b. Percentage of International Annealed Copper Standard (IACS) value for Volume Electrical Conductivity, which equals 100 percent at 68°F (20°C).

Table 1.4C
Weldability and Properties of Nonheat-Treatable Wrought Aluminum Alloys
TYPICAL MECHANICAL PROPERTIES

Aluminum Alloy	Temper	Ultimate Tensile Strength		Yield Strength (0.2% Offset)		Elongation % in 2 in. (50.8 mm)		Shear Strength		Fatigue Strength ^a		Brinnell Hardness ^b (500 kg load)
		ksi	MPa	ksi	MPa	1/16 in. (1.6 mm) Sheet	1/2 in. (12.7 mm) Round	ksi	MPa	ksi	MPa	
1060	-O	10	69	4	28	43	—	7	48	3	21	19
	-H18	19	131	18	124	6	—	11	76	7	45	35
1100	-O	13	90	5	34	35	45	9	62	5	34	23
	-H18	24	166	22	152	5	15	13	90	9	62	44
1350	-O	12	83	4	28	—	23	8	55	—	—	—
	-H19	27	186	24	166	—	1.5	15	103	7	48	—
3003	-O	16	110	6	41	30	40	11	76	7	48	28
	-H14	22	152	21	145	8	16	14	96	9	62	40
	-H18	29	200	27	186	4	10	16	110	10	69	55
3004	-O	26	179	10	69	20	25	16	110	14	96	46
	-H34	35	241	29	200	9	12	18	124	15	103	63
	-H38	41	283	36	248	5	6	21	145	16	110	77
5005	-O	18	124	6	41	25	—	11	76	—	—	28
	-H34	23	159	20	138	8	—	14	96	—	—	41
	-H38	29	200	27	186	5	—	16	110	—	—	51
5050	-O	21	145	8	55	24	—	15	103	12	83	36
	-H34	28	193	24	166	8	—	18	124	13	90	53
	-H38	32	221	29	200	6	—	20	138	14	96	63
5052, 5652	-O	28	193	13	90	25	30	18	124	16	110	47
	-H34	38	262	31	214	10	14	21	145	18	124	68
	-H38	42	290	37	255	7	8	24	166	20	138	77
5083	-O	42	290	21	145	—	22	25	172	—	—	—
	-H116	46	317	33	228	—	16	—	—	23	159	—
	-H321	46	317	33	228	—	16	—	—	23	159	—
5086	-O	38	262	17	117	22	—	23	159	—	—	—
	-H116	42	290	30	207	12	—	—	—	—	—	—
	-H34	47	324	37	255	10	—	27	186	—	—	—
5154, 5254	-O	35	241	17	117	27	—	22	152	17	117	58
	-H112	35	241	17	117	25	—	—	—	17	117	63
	-H34	42	290	33	228	13	—	24	166	19	131	73
	-H38	48	331	39	269	10	—	28	193	21	145	80
5454	-O	36	248	17	117	22	—	23	159	—	—	62
	-H32	40	276	30	207	10	—	24	166	—	—	73
	-H34	44	303	35	241	10	—	26	179	—	—	81
5456	-O	45	310	23	159	—	24	—	—	—	—	—
	-H112	45	310	24	166	—	22	—	—	—	—	—
	-H116	51	352	37	255	—	16	30	207	—	—	90

a. Fatigue strength for round specimens and 500 million cycles.

b. 10-mm ball used.

Description

magnesium- and manganese-alloyed
Mg4.5Mn electrode for the GMAW of alloys
of the same composition. This wire produces
higher strength to the base metal than a wire of
the AlMg5 type. OK Autrod 18.16 is usually welded
with pure Ar as the shielding gas.

Welding current:
(+)

Classifications

AWS A5.10-92	ER5183
BS 2901	5183
DIN 1732	SG-AlMg4.5Mn

Wire composition

Si	Mn	Mg	Fe	Al
<0.2	0.6	4.8	<0.2	bal.

Typical properties all weld metal

Yield stress	140 MPa
Tensile strength	290 MPa
Elongation	25%

Charpy V

Test temps +20°C	Impact values 30 J
---------------------	-----------------------

Approvals

DB	61.039.03/QS
LR	(Ar/He)
DnV	AlMg4.5Mn (5083)
TUV	
UDT	

Welding parameters

Diameter mm	Wire feed m/min	Welding current A	Arc voltage V	Deposition rate kg weld metal/hour
0.8	11-14	80-120	20-24	0.9-1.1
1.0	7-14	90-180	22-26	0.9-1.8
1.2	7-13	130-200	22-28	1.2-2.3
1.6	5-8	170-300	24-30	1.6-2.6
2.4	3-4	250-370	26-32	2.2-2.9

Table 5-4 — Aluminum Wires
Chemical Composition Requirements* (Percent, Balance Aluminum)

AWS CLASS	L-TEC DESIGNATION	MAGN.	IRON & SILICON	IRON	SILICON	COPPER	MANG.	CHROM.	ZINC	NICK.	TITAN.
ER1100	1100 HQ (1)	—	1.0	—	—	0.05-0.20	0.05	—	0.10	—	—
ER1260	—	—	0.40	—	—	0.04	0.01	—	—	—	—
ER2319	—	0.02	—	0.30	0.20	5.8-6.8	0.20-0.40	—	0.10	—	0.10-0.20
ER4145	—	0.15	—	0.80	9.3-10.7	3.3-4.7	0.15	0.15	0.20	—	—
ER4043	4043 HQ (1)	0.05	—	0.80	4.5-6.0	0.30	0.05	—	0.10	—	0.20
ER4047	—	0.10	—	0.80	11.0-13.0	0.30	0.15	—	0.20	—	—
ER5039	—	3.3-4.3	—	0.40	0.10	0.03	0.30-0.50	0.10-0.20	2.4-3.2	—	0.10
ER5554	5554 HQ (1)	2.4-3.0	0.40	—	—	0.10	0.50-1.0	0.05-0.20	0.25	—	0.05-0.20
ER5654	5654 HQ (1)	3.1-3.9	0.45	—	—	0.05	0.01	0.15-0.35	0.20	—	0.05-0.15
ER5356	5356 HQ (1)	4.5-5.5	0.50	—	—	0.10	0.05-0.20	0.05-0.20	0.10	—	0.06-0.20
ER5556	5556 HQ (1)	4.7-5.5	0.40	—	—	0.10	0.50-1.0	0.05-0.20	0.25	—	0.05-0.20
ER5183	5183 HQ (1)	4.3-5.2	—	0.40	0.40	0.10	0.50-1.0	0.05-0.25	0.25	—	0.15
R-CN4A	—	0.03	—	1.0	1.5	4.0-5.0	0.35	—	0.35	—	0.25
R-CN42A	—	1.2-1.8	—	1.0	0.70	3.5-4.5	0.35	0.25	0.35	1.7-2.3	0.25
R-SC51A	—	0.40-0.60	—	0.80	4.5-5.5	1.0-1.5	0.50	0.25	0.35	—	0.25
R-SG70A	—	0.20-0.40	—	0.60	6.5-7.5	0.25	0.35	—	0.35	—	0.25

*AWS A5.10-69

(1) HQ is L-TEC's designation for shaved wire.

Table 5-5 — Guide to Choice of Filler Metal for General Purpose Aluminum Welding

BASE METAL	319, 333 354, 355 C355	13, 43, 344 356, A356 A357, 358	214, A214 B214, F214	7039 A612, C612 D612, 7005a	6061, 6063 6101, 6151 6201, 6951	5456	5454	5154 5254a	5086	5083	5052 5652a	5005 5050	3004 Alc. 3004	2219	2014 2024	1100 3003 Alc. 3003	1060 EC	
1060, EC	ER414Sc,	ER4043, f	ER4043e,	ER4043,	ER4043,	ER4043,	ER5356c	ER4043e,	ER4043e,	ER5356c	ER5356c	ER4043	ER1100c	ER4043	ER4145	ER4145	ER1100c	ER1260e
1100, 3003 Alclad 3003	ER414Sc,	ER4043, f	ER4043e,	ER4043,	ER4043,	ER4043,	ER5356c	ER4043e,	ER4043e,	ER5356c	ER5356c	ER4043e,	ER4043e	ER4043e	ER4145	ER4145	ER1100c	
2014, 2024	ER4145g	ER4145	—	—	ER4145	ER4145	—	—	—	—	—	—	—	—	ER4145g	ER4145g		
2219	ER4145g,c,	ER4145c,	ER4043,	ER4043,	ER4043f,	ER4043f,	ER4043	ER4043,	ER4043,	ER4043	ER4043	ER4043,	ER4043	ER4043	ER2319c, f,			
3004 Alclad 3004	ER4043,	ER4043,	ER5654b	ER5356e	ER4043e	ER4043b	ER5356e	ER5654b	ER5654b	ER5356e	ER5356e	ER4043e,	ER4043e	ER4043e				
5005, 5050	ER4043,	ER4043,	ER5654b	ER5356e	ER4043e	ER4043b	ER5356e	ER5654b	ER5654b	ER5356e	ER5356e	ER4043e,	ER4043e					
5052, 5652a	ER4043,	ER4043e,	ER5654b	ER5356e,h	ER5356e,c	ER5356e,c	ER5356b	ER5654b	ER5654b	ER5356e	ER5356e	ER5654b,c						
5083	—	ER5356e,c,	ER5356e	ER5183e,h	ER5356e	ER5356e	ER5183e	ER5356e	ER5356e	ER5356e	ER5356e	ER5183e						
5086	—	ER5356e,c,	ER5356e	ER5356e,h	ER5356e	ER5356e	ER5356e	ER5356b	ER5356b	ER5356e								
5154, 5254a	—	ER4043e,	ER5654b	ER5356e,h	ER5356e,c	ER5356e,c	ER5356b	ER5654b	ER5654b									
5454	ER4043,	ER4043e,	ER5654b	ER5356e,h	ER5356e,c	ER5356e,c	ER5356b	ER5554c,d										
5456	—	ER5356e,c,	ER5356e	ER5556e,h	ER5356e	ER5356e	ER5556e											
6061, 6063 6101, 6201 6151, 6951	ER414Sc,	ER4043e,	ER5356e,c	ER5356e,c,h	ER4043e,	ER4043e,												
6070	ER414Sc,	ER4043e,	ER5356e,c	ER5356e,c,h	ER4043e,													
7039 A612, C612 D612, 7005a	ER4043,	ER4043e,h	ER5356e,h	ER5039e														
214, A214 B214, F214	—	ER4043e,	ER5654b,d															
13, 43, 344 356, A356 A357, 358	ER414Sc,	ER4043e,																
319, 333 354, 355, C355	ER4145d,c,																	

NOTE: 1 — Service conditions such as immersion in fresh or salt water, exposure to specific chemicals or a sustained high temperature (over 150°F) may limit the choice of filler metals.

NOTE: 2 — Recommendations in this table apply to gas shielded-arc welding processes. For gas welding, only R1100, R1260 and R4043 filler metals are ordinarily used.

NOTE: 3 — Filler metals designated with ER prefix are listed in AWS specification A5.10

a Base metal alloys 5652 and 5254 are used for hydrogen peroxide service. ER5654 filler metal is used for welding both alloys for low-temperature service (150°F and below).

b ER5183, ER5356, ER5554, ER5556 and ER5654 may be used. In some cases they provide (1) improved color match after anodizing treatment, (2) highest weld ductility, and (3) higher weld strength. ER5554 is suitable for elevated temperature service.

c ER4043 may be used for some applications.

d Filler metal with the same analysis as the base metal is sometimes used.

e ER5183, ER5356 or ER5556 may be used.

f ER4145 may be used for some applications.

g ER2319 may be used for some applications.

h ER5039 may be used for some applications.

i ER4047 may be used for some applications.

NOTE: 1 — Service conditions such as immersion in fresh or salt water, exposure to specific chemicals or a sustained high temperature (over 150°F) may limit the choice of filler metals.

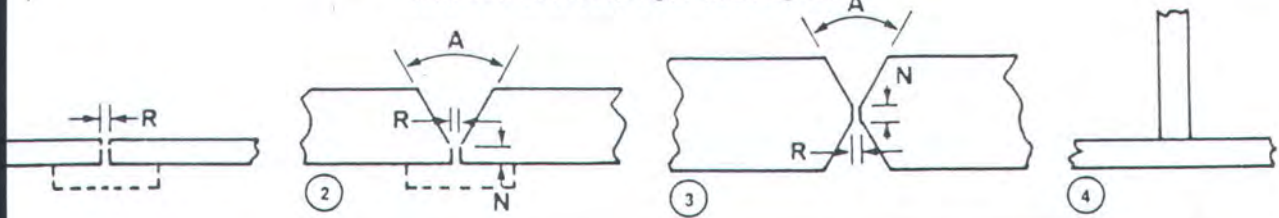
NOTE: 2 — Recommendations in this table apply to gas shielded-arc welding processes. For gas welding, only R1100, R1260 and R4043 filler metals are ordinarily used.

NOTE: 3 — Filler metals designated with ER prefix are listed in AWS specification A5.10

- a Base metal alloys 5652 and 5254 are used for hydrogen peroxide service. ER5654 filler metal is used for welding both alloys for low-temperature service (150°F and below).
- b ER5183, ER5356, ER5554, ER5556 and ER5654 may be used. In some cases they provide (1) improved color match after anodizing treatment, (2) highest weld ductility, and (3) higher weld strength. ER5554 is suitable for elevated temperature service.
- c ER4043 may be used for some applications.
- d Filler metal with the same analysis as the base metal is sometimes used.
- e ER5183, ER5356 or ER5556 may be used.
- f ER4145 may be used for some applications.
- g ER2319 may be used for some applications.
- h ER5039 may be used for some applications.
- i ER4047 may be used for some applications.
- j ER1100 may be used for some applications.
- k This refers to 7005 extrusions only.

NOTE: 4 — Where no filler metal is listed, the base metal combination is not recommended for welding

TABLE 8-4 — Welding Conditions-Aluminum Spray Arc Process
5356 Wire Electrode, Argon Shielding Gas



THICK. IN.	mm	POSITION	JOINT DE- SIGN	FILLER METAL DIA.		CURRENT DCRP	(5) VOLT.	TRAVEL SPEED		ARGON GAS		NO. OF PASSES
				IN.	mm			IPM	mm/sec.	CFH	lph	
1/8	(3.2)	F,H,V,O ⁽⁴⁾	1,4	.030	.76	130-140	19-21	18-22	8-9	35	991	2,1
			1,4	3/64	1.19	140-150	19-21	35-40	15-17	35	991	2,1
1/4	(6.4)	F	1	3/64	1.19	180-190	22-24	21-26	9-11	40	1133	2
			2	3/64	1.19	160-170	20-22	28-33	12-14	40	1133	3
		H	1	3/64	1.19	160-170	20-22	28-33	12-14	40	1133	2
			2	3/64	1.19	200-210	22-24	32-36	13-15	40	1133	3
		V & O ⁽⁴⁾	4	3/64	1.19	200-210	21-23	19-23	8-10	40	1133	1
			1	3/64	1.19	150-160	19-21	28-33	12-14	45	1274	2
			2	3/64	1.19	200-210	22-24	32-36	14-15	45	1274	3
			4	3/64	1.19	200-210	21-23	19-23	8-10	45	1274	1
			2	1/16	1.6	250-260	21-23	28-34	12-14	40	1133	3
			2	1/16	1.6	240-250	21-23	26-31	11-13	40	1133	4
3/8	(9.6)	F	2	1/16	1.6	250-260	21-23	28-34	12-14	40	1133	3
			2	1/16	1.6	240-250	21-23	26-31	11-13	40	1133	4
		H	4	1/16	1.6	260-270	22-24	15-20	6-8	40	1133	1
			2	1/16	1.6	220-230	21-23	24-28	10-12	45	1274	4
		V & O ⁽⁴⁾	4	1/16	1.6	220-230	21-23	24-28	10-12	45	1274	2
			2	1/16	1.6	220-230	21-23	24-28	10-12	45	1274	2
1/2	(12.8)	F	2	1/16	1.6	250-260	22-24	25-29	11-12	40	1133	4
			3	1/16	1.6	270-280	22-24	32-36	14-15	40	1133	4
			2	1/16	1.6	250-260	22-24	25-29	11-12	40	1133	4
			3	1/16	1.6	220-230	21-23	20-24	8-10	40	1133	6
		H	4	1/16	1.6	270-280	22-24	22-26	9-11	40	1133	3
			4	3/32	2.4	280-290	24-26	19-24	8-10	50	1416	2
		V & O ⁽⁴⁾	2	1/16	1.6	220-230	21-23	21-25	9-11	45	1274	4
			3	1/16	1.6	220-230	21-23	21-25	9-11	45	1274	4
			4	1/16	1.6	240-250	21-23	18-22	8-9	45	1274	3
			2	1/16	1.6	270-280	22-24	25-29	11-12	40	1133	4
			3	1/16	1.6	270-280	22-24	32-36	14-15	40	1133	4
			2	1/16	1.6	250-260	22-24	25-29	11-12	40	1133	4
			3	1/16	1.6	220-230	21-23	20-24	8-10	40	1133	6
			4	1/16	1.6	270-280	22-24	22-26	9-11	40	1133	3

TABLE 8-4 — Continued

THICK. IN.	mm	POSITION	JOINT DE- SIGN	FILLER METAL DIA.		CURRENT DCRP	(5) VOLT.	TRAVEL SPEED		ARGON GAS		NO. OF PASSES
				IN.	mm			IPM	mm/sec.	CFH	lph	
5/8	(16.0)	F	3	1/16	1.6	270-280	22-24	28-33	12-14	40	1133	6
			3	3/32	2.4	310-320	25-27	25-30	11-13	45	1274	4
			4	1/16	1.6	270-280	22-24	13-17	5-7	40	1133	3
			4	3/32	2.4	310-320	26-28	17-21	7-9	45	1274	3
		H	3	1/16	1.6	250-260	22-24	30-34	13-14	40	1133	8
			2	1/16	1.6	230-240	22-24	21-25	9-11	45	1274	6
			3	1/16	1.6	230-240	22-24	21-25	9-11	45	1274	6
			4	1/16	1.6	250-260	22-24	21-25	9-11	45	1274	6
3/4	(19.2)	F	3	3/32	2.4	310-320	26-28	15-19	6-8	40	1133	4
			3	1/16	1.6	260-270	22-24	23-27	10-11	45	1274	8
			4	3/32	2.4	350-360	28-30	15-19	6-8	40	1133	4
			2	1/16	1.6	230-240	22-24	21-25	9-11	45	1274	8
		V & O ⁽⁴⁾	3	1/16	1.6	230-240	22-24	21-25	9-11	45	1274	8
			4	1/16	1.6	230-240	22-24	19-23	8-10	45	1274	6
			2	1/16	1.6	230-240	22-24	21-25	9-11	45	1274	12
			3	1/16	1.6	230-240	22-24	21-25	9-11	45	1274	12
1	(25.4)	F	3	3/32	2.4	310-320	26-28	15-19	6-8	40	1133	6
			3	3/32	2.4	280-300	24-26	23-27	10-11	45	1274	8
			4	3/32	2.4	350-360	28-30	15-19	6-8	40	1133	6
			2	1/16	1.6	230-240	22-24	21-25	9-11	45	1274	12
		V & O	3	1/16	1.6	230-240	22-24	21-25	9-11	45	1274	12
			4	1/16	1.6	250-260	22-24	19-23	8-10	45	1274	10
			2	1/16	1.6	230-240	22-24	21-25	9-11	45	1274	12
			3	1/16	1.6	230-240	22-24	21-25	9-11	45	1274	12

NS - F - Flat

H - Horizontal

V - Vertical

O - Overhead

ALUMINUM WELDING CONDITIONS

NOTE 1 - Square Butt (0 root opening) or square butt with temporary backup.

NOTE 2 - Included angle dependent on torch accessibility to root. Angle increases with increasing plate thickness.

NOTE 3 - For lap welds increase speed 10%.

NOTE 4 - Welding in the overhead position of butt joints without backing is not recommended.

NOTE 5 - Arc voltage measured between guide tube and the work.

NOTE 6 - Joint I: R = 0.1/16" (1.6mm)

Joint II: R = 1/16" (1.6mm)

N = 1/32" (0.8mm)

A = 60°

Joint III: R = 0.1/32" (0.8mm)

N = 1/16" (1.6mm)

A = 60° - 70°

